

JAERI-M
9173

遠心分離法による低濃縮施設に対する
ダイナミック計量管理の適用性の研究(I)

1980年11月

猪 川 浩 次

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

遠心分離法による低濃縮施設に対するダイナミック計量管理の適用性の研究(I)

日本原子力研究所動力炉開発・安全性研究管理部

猪川 浩次

(1980年10月15日受理)

遠心分離法による濃縮プラントでは、カスケードホールは査察官に対して接近禁止となる可能性が高く、このため査察側から、カスケードの悪用による核物質の転用が発生する施設として注目されている。現在、カスケードホールをブラックボックスとした場合にも、そこで転用が起っていないことを保証できるような保障措置の方法が要求されている。その方法の1として、再処理施設及び混合酸化物燃料(MOX)加工施設に対してその適用性の高さが確認されつゝあるダイナミック計量管理技術を濃縮施設に適用することを考えた。本報告書は、低濃縮施設に対して在来型計量管理法を適用したときの限界、ダイナミック計量管理を適用した場合の潜在的改良の可能性と付随する問題について考察を加えたものである。その解析結果は、遠心濃縮施設に対するダイナミック計量管理の適用可能性を示している。

Feasibility Study on the Application of the Basic Concepts of
Dynamic Materials Accountancy to a Uranium Enrichment Facility
Using Centrifuge Process (I)

Koji IKAWA

Division of Power Reactor Projects, JAERI

(Received October 16, 1980)

In case of a uranium enrichment facility using centrifuge process, the cascade hole would be inhibited from accessing by the international inspectorate. Since such a facility has a potential possibility to misuse the cascade for a clandestine purpose, the facility is noted as one having a safeguards significance. Thus, effective safeguards measures which make assurance of no diversion in the cascade hole of a black box have been investigated. The author considers, for one of such measures, application of the dynamic materials accountancy concept to the enrichment facility. The concept have been recognized to have a high applicability to spent fuel reprocessing facilities or mixed-oxide fuel fabrication facilities.

This report describes about the limit of conventional materials accountancy in a centrifuge enrichment facility, and the possible improvement of safeguardability and problems associated with the adoption of the dynamic materials accountancy. This study shows that the dynamic materials accountancy would have a potential applicability to the uranium enrichment facility using centrifuge process.

Key words ;

Centrifuge, Enrichment Plant, Safeguards, Dynamic Materials Accountancy,
Simulation Study

目 次

1. ウラン濃縮施設と保障措置	1
1.1 核不拡散と保障措置についての論理関係	1
1.1.1 一般論	1
1.1.2 ウラン濃縮施設における核拡散の可能性	3
1.2 保障措置戦略と国際システム	5
1.2.1 保障措置システムの外部クライテリア	5
1.2.2 保障措置戦略	8
1.3 計量管理とその検認	14
1.3.1 設計情報とその審査	14
1.3.2 冒頭報告の検認	14
1.3.3 記録の照合検査	14
1.3.4 流れの検認	14
1.3.5 実在庫の検認	15
1.4 秘密カスケードの検出と防止の戦略	16
1.4.1 立入拒否区域の排除	16
1.4.2 動的計量管理の適用による保障措置の改良	16
1.4.3 封じ込め/監視の強化による保障措置の改良	16
2. 動的計量管理による改良の可能性の検討	18
2.1 動的計量管理と静的計量管理	18
2.1.1 静的計量管理の概念と問題点	18
2.1.2 動的計量管理の概念と問題点	22
2.1.3 動的計量管理の数学的モデル	25
2.1.4 動的計量管理システムの設計法	30
2.2 仮想濃縮プラントにおける静的計量管理	34
2.3 動的計量管理の適用の可能性と問題点	38
2.3.1 可能性の予測	38
2.3.2 問題点	39
2.3.3 可能性の定量的検討法の開始	39
3. 結 言	41
謝 辞	41
参考文献	42

Contents

1.	Uranium Enrichment Facility and Safeguards	1
1.1	Logical Relations between Non-Proliferation of Nuclear Material and Safeguards	1
1.1.1	General Considerations	1
1.1.2	Potential of Proliferation in Uranium Enrichment Facility . .	3
1.2	Safeguards Strategies and International System	5
1.2.1	External Criteria of Safeguards System	5
1.2.2	Safeguards Strategies	8
1.3	Materials Accountancy and its Verification	14
1.3.1	Design Information and its Verification	14
1.3.2	Verification of the Initial Report	14
1.3.3	Record Audit	14
1.3.4	Flow Verification	14
1.3.5	Verification of Physical Inventory	15
1.4	Strategies of Detection and Protection of Crandestine Cascades	16
1.4.1	Removal of Non-Access Area	16
1.4.2	Improvement of Safeguards Effectiveness by the Application of Near-Real-Time Materials Accountancy and Control	16
1.4.3	Improvement of Safeguards Effectiveness by the Extensive Use of Containment and Surveillance Measures	16
2.	Examination of Improvement Expected by the Use of Near-Real- Time Materials Accountancy	18
2.1	Near-Real-Time Materials Accountancy and Traditional Materials Accountancy	18
2.1.1	Concept of Traditional Materials Accountancy and its Problems	18
2.1.2	Concept of Near-Real-Time Materials Accountancy and its Problems	22
2.1.3	Mathematical Model of Near-Real-Time Materials Accountancy .	25
2.1.4	Designing of Near-Real-Time Materials Accountancy Systems . .	30
2.2	Traditional Materials Accountancy in a Hypothetical Enrichment Plant	34
2.3	Applicability of Near-Real-Time Materials Accountancy in a Enrichment Plant and Associated Problems	38

2.3.1	Applicability	38
2.3.2	Problems	39
2.3.3	Initiation of Quantitative Evaluation of the Applicability . .	39
3.	Conclusions	41
	Acknowledgments	41
	References	42

1. ウラン濃縮施設と保障措置

1.1 核不拡散と保障措置についての論理関係

1.1.1 一般論

保障措置制度の背景となるべき基本的な不拡散論理の主要な前提あるいは構成要素として、次に列挙する行為があるが、これらの行為は核兵器の拡散の観点からすべて同等に重大な脅威になるものと規定される。

- i 核兵器の移転
- ii 高濃縮ウランとか謂ゆる兵器級プルトニウムなど容易に兵器に使用出来る物質を正当でない理由で移転すること。
- iii 燃料供給保障の約束を破ること。
- iv 秘密施設を建設し運転すること。
- v 兵器に使える物質を許可なく転用すること。
- vi 正当化出来ない「危険な技術」を移転すること。

以上の6項目は、各々もっと精密で詳細な定義と説明が必要であるが、ここで列挙した目的は、これらの核拡散の脅威に対して、対抗手段として考えられている現在のNPT保障措置の目的と手段を再確認するためであるのでこれ以上の詳述は行なわない。NPT保障措置では、「有意量の核物質が平和的な原子力活動から核兵器その他の核爆発装置の製造のため、または不明な目的のために転用されることをtimelyに検知すること、および早期検知の危惧を与えることによって、転用を抑止する。」ことが目的とされている。前記6項目の拡散の脅威要素と比較すれば、NPT保障措置の限界が明確になってくる。しかしここで保障措置が無力であるというつもりはない。核兵器の不拡散を実効たらしめる手段としてのNPT保障措置は、制定当初から限られた条件の中で限られた効果をもつように作り上げられているのであって、このことを認識しなければ保障措置の有効な実施とは何かの概念規定そのものが曖昧になってしまう。

保障措置は基本的に抑止手段ということを再確認することが重要である。一方、物理的防護手段によって核物質の転用を防止するという物理的強制手段があるが、国際政策においては、抑止手段の方がより重要で意味が深い。その意味で、保障措置は、必ずしも転用の事実を検出するのではなく、転用が起こったかも知れないという証拠を検出するように設計されるべきである。後者でいう証拠とは、保障措置目的からみて正常でない事実であり、謂ゆるAnomalyと呼ばれるものである。Anomalyを検出するためには、転用の可能性のまわりにこれを取り巻く形で1つのシステムを設計して、それに対する違反あるいは違反の疑いを検討するということが大切になってくる。

Anomalyはその定義からして、前記の保障措置目的の中でその性格が明示される。さらにそれは、保障措置の手段として計量管理を主要手段とし封じ込め監視を重要な補助手段とすることが規定されていることから、一層明白になる。即ち、計量管理については最終的な判断基

準としての Anomaly が謂ゆる不明損失量 (MUF) の異常値であり、封じ込め監視については封印の破損とか TV や映画に映る異常信号などがそうである。計量管理の面での中間的な Anomaly は、記録と報告の不一致、受払い間差異の異常、実在庫検認における異常など、各種多様である。封じ込め監視の異常は、その都度、内容別に判定が必要であり、それだけに、より実際に即した手段ということが出来る。

当然の事乍ら、検定の結果で計量誤差でないとは判断されたとしても、それは、有意量の転用の可能性を示したのに過ぎず、これは帳簿在庫の再検認、実在庫の再検認、累積 MUF などの歴史的経過の考慮、未計量在庫の検定等々、計量管理全体の見直しの出発点となるものである。

さて、このような検認活動を可能とするシステムこそが、前述の Anomaly 検出のシステムなのであり、現在の保障措置の目的を達成させることの出来るシステムであるということが出来よう。しかるに、今日までなされてきた国際保障措置では、物質の計量と管理だけが実行上効果的な唯一の手段としてあまりにも強調されすぎて来た。又、対象とするシステムが本質的に動的システムであるものを、画一的で静的システムであるかの如く取扱って来たために、多くの誤解を生じている。その基本的なものは〔MUF 異常値の検出〕＝〔転用の事実の検出〕と誤解していることであろう。これは上述したように Anomaly の検出でしかない。

第 2 の誤解は上記と密接に関係しているが、それは

$$\begin{aligned} \text{〔 MUF の確定期間 〕} &= \text{〔 棚卸し期間 〕} \\ &= \text{〔 転用検出時間 〕} \end{aligned}$$

という固定的考え方である。この考えは通常査察に対する評価が忘れられ、かつ封じ込め監視機構の果たす役割が忘れられたことによってあらわれて来たものであろう。既述の如く通常査察によって計量管理上の、あるいは封じ込め監視機構上の Anomaly が検出されれば、そしてそれが有意量の核物質の転用の可能性に結びつく可能性があるのなら、直ちにその物質収支区域ないしはその Anomaly 発見の近傍に対して特別査察が実施され、通常それは実在庫の検認を含むものになる。したがって、その終了時点ではその時点までの物質収支に対する MUF が確定するのであり、これに対して前記の検定も実施可能となるのである。封じ込め監視の異常検出の場合でも同様である。したがって転用検出時間はむしろ通常査察あるいは封じ込め監視機構の検認期間に、より強く関係したものである筈である。しかし今日行なわれている通常査察に、確かにその機能があるとは云い切れない。しかし、それを可能とすることは、施設設計と査察側の協力によって出来る。そのような保障措置システムが、今求められている「改良保障措置」である。

その要件の一つとしては、対象がその適用の要件を備えている限りにおいて、計量管理をダイナミックな形で取扱い、Anomaly としての性質をより強く持つ Dynamic MUF とも言うべきものを作り出し、その Timely な評価を可能とする方式が考えられる。また、封じ込め監視機構については、検認期間がより短かく、信頼性があり、ダイナミック計量管理との連結が効果的に行なえるものである事がより望ましい。この 2 つの機構が Anomaly の早期検出という目的のために適切な形で統合されたとき、そのシステムは保障措置の目的である抑止効果を最も強く発揮するものとなろう。もちろん上記 2 つのほかにも、保障措置の目的に有効に利用出来るパラメータは考えられるが、その開発はまだ技術的に十分な水準に達していない。

1.1.2 ウラン濃縮施設における核拡散の可能性

ウラン濃縮施設にかかわる核拡散の可能性は次の2つのカテゴリーの下で考察される。

- (i) 保障措置下の施設における核物質が、秘密目的のために施設外に持ち出される一つまり転用される一可能性、通常これはMUFとして物質収支上に顕われて来る。転用者は、それをデータ偽造で隠そうとすることもあれば、そうしないこともある。
- (ii) 保障措置下にあるカスケード、あるいはその一部が、より高い濃縮度のウランを生産するのに使われる。後に造られた高濃縮ウランが転用される可能性。この場合も転用者は、転用の事実を隠すために計量管理データを偽造することもあれば、そうしない場合もある。また、高濃縮ウラン生産に使われた分と置き換えるために、余分の原料ウランを持ち込もうとするかも知れない。上記の第2のカテゴリーには高濃縮ウランの製造を含んでいるので、第1のカテゴリーよりも核拡散上の危険度は高い。

保障措置適用物質の転用一第1カテゴリー

保障措置の適用されている核物質が、何らかの計量管理データの偽造なしに転用される場合には、転用された量は物質収支の中でMUF又はS/RDとして顕われて来る。これは既知の計量誤差の限界内でMUFやS/RDに対する統計検定によって発見することが可能である。計量管理がダイナミック計量管理であれば、AnomalyとしてのDynamic MUF(以後MUFdと書く)や受払間データの検定により、早期に検出することが可能となろう。したがってここでは計量管理データの偽造の可能性の方に焦点をあわせることにする。

- ・ 物質収支期間中に実際に行なわれた1個以上の受け入れを書きもらす。
- ・ 受け入れ時の測定データを過小申告するか、未修正の負のバイアスをもった測定値を用いる。
- ・ 当該物質収支期間に実在しなかった払い出しを捏造する。
- ・ シリンダーに充填したUF₆に対する測定データを過大申告するか、未修正の正のバイアスをもった測定値を用いる。
- ・ UF₆シリンダーの払出しに際して、欠陥シリンダー(例えば空、部分充填、ある公称値より低い濃縮度のウランを充填したようなシリンダー)を含ませることによってデータを偽造する。
- ・ 濃縮プロセスのテイルにおける測定データを過大申告するか、未修正の正のバイアスをもった測定値を用いる。
- ・ 固体廃棄物の測定データを過大申告する。
- ・ 事故によるロスを捏造する。
- ・ 事故損失による量を過大申告する。

上記の外に、計量誤差を大き目にすることによって有意なMUFが有意でないとして受け入れられるように計る可能性もある。

また、棚卸しにおいても次のような可能性がある。

- ・ 別のMBAや施設から核物質を借用する。
- ・ 実在しないアイテムを在庫アイテムリストに含める。
- ・ 在庫表の中に同一アイテムを重複して載せる。

- ・ 過大申告測定値で在庫アイテム表を作る。
- ・ 未修正の正バイアスをもつ測定値を用いる。
- ・ 測定の不確かさを増大させる。

保障措置下にあるカスケードの悪用 - 第2 カテゴリー

これについては遠心分離濃縮プラントにおける次の2例を代表的な悪用の例として考え、その対抗手段の可能性に触れておく。

- (i) 査察官の立入禁止区域内に秘密の半独立カスケードがあって、その原料としては申告済のカスケードの製品を使い、90%の高濃縮ウランを生産する一方でテイルを0.71%にして申告済カスケードの原料として戻す。この変形としては秘密カスケードのテイル濃度を申告済のカスケードのそれと同一に合わせるものがある。
- (ii) 申告済のカスケードの真の容量が申告してある容量より大きく、この余分の容量は申告値と同じ濃縮度(4~5%)の余分の製品を製造するのに使われる。このシナリオの場合には、濃度(X_P , X_p , X_T)は申告値に保たれ、秘密の余剰製品は秘密の独立カスケードに供給される。Fig. 1.1はこのような応用の例を示したものである。これから判る通り90%濃縮ウランの形で25kgのU-235を秘密に生産するのに必要な秘密のカスケードはほんの僅か(~2 t/a SWU)でよく、3%濃縮ウラン約1トンを横流しすればよいのである(これは200 t/a SWUのカスケードの製品の約1.5%に相当する)。この場合、秘密カスケードから出るテイルは、200 t/a SWUカスケードの申告済原料の約0.2%にしかない。

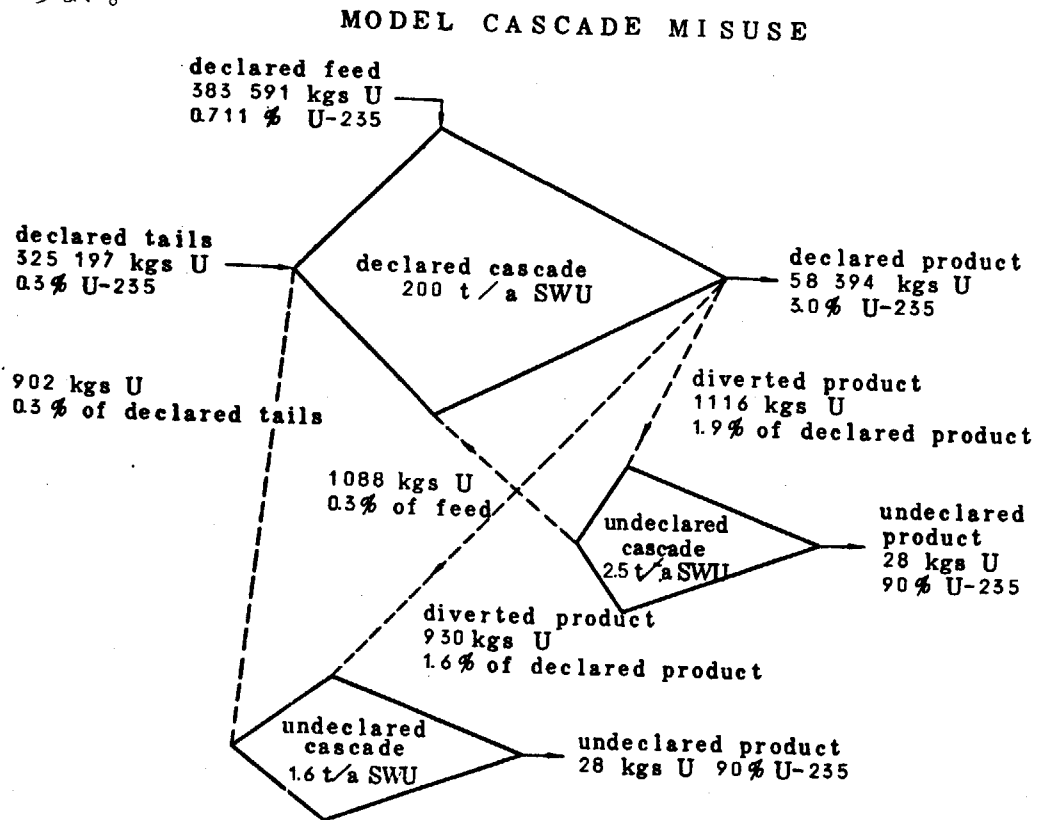


Fig. 1.1 遠心分離濃縮工場におけるカスケード悪用のモデル。90%濃縮度で年間25kgU-235を秘密生産する場合の秘密カスケード悪用モードの2例

Throughput に対する割合で表わした計量誤差が 1σ で $\pm 0.2\%$ であり、かつ検認の目標量 (Goal Quantity) が 5σ であると仮定すると、上記の程度の転用は検知することが出来る。ただし、上記の例題は 200 t/a SWU のプラントに対するものであって、Throughput がもっと大きくなれば、それに占める転用の比率がその分だけ小さくなるので検知するのは一層難しくなってくる。

1.2 保障措置戦略と国際システム

1.2.1 保障措置システムの外部クライテリア

Fig. 2 は国際保障措置システムの基本構造を示したものである。

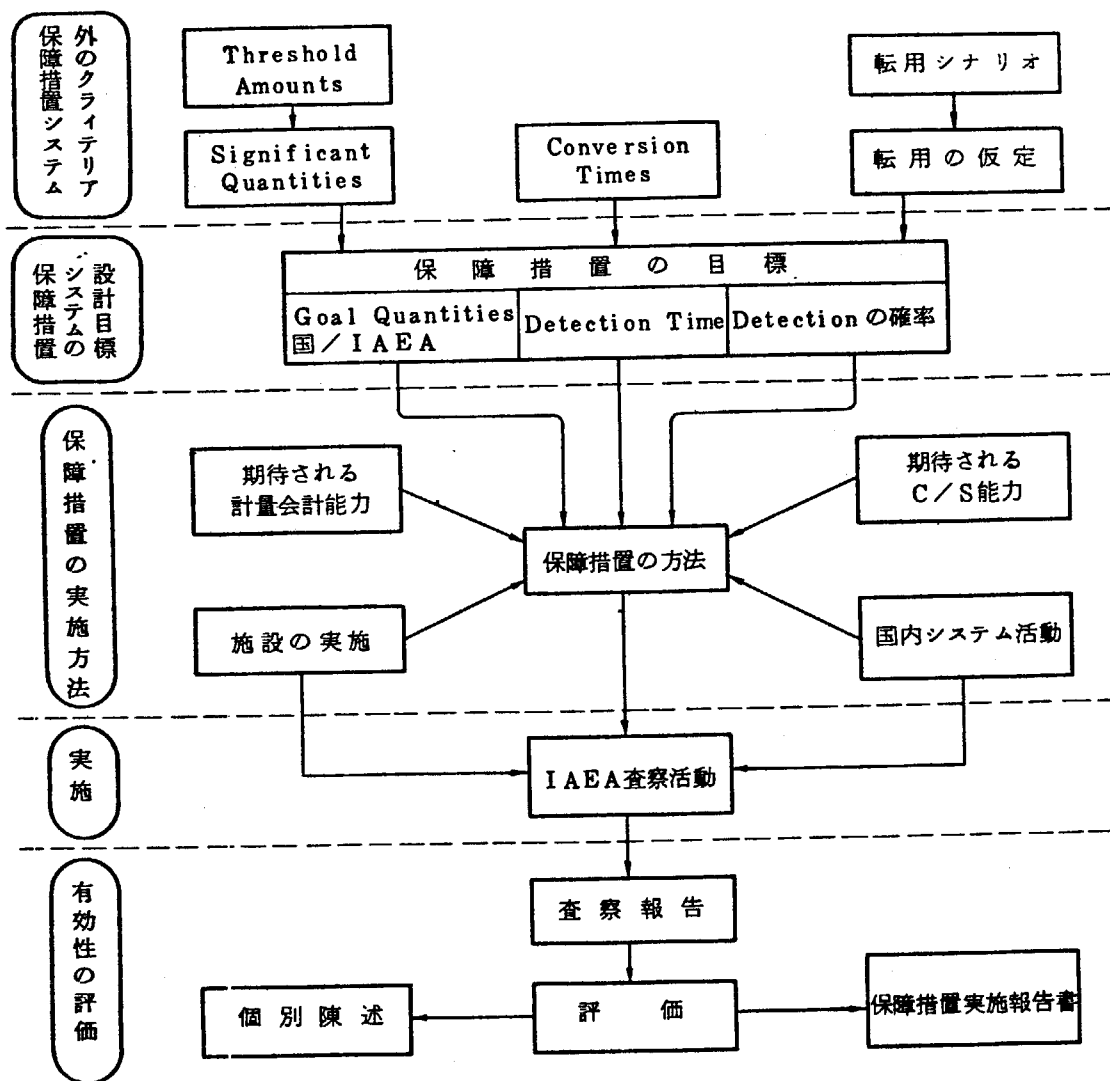


Fig. 1.2 保障措置の設計と実施の要素

(i) 有意量 (Significant Quantity)

「有意量」の定義は「閾値 (Threshold Amount)」に関連して決められる。閾値は 1 箇の核発装装置を作るのに必要な特殊核分裂物質の概量であると理解されており、その値は此の関

連のUNレポート⁽¹⁾に記載されているデータに基づいて採用されているが、最近幾分従来値より低目の値が公表さ⁽²⁾れている。

「有意量」は、1箇の核爆発装置を製造する可能性—何らかの転換プロセスも考慮して—を排除することは出来ないような核物質の概量と理解されている、というのがIAEAの最近の定義であるが、端的に云うならば、プロセスを考慮して閾値が造り出せるだけの量ということになる。

Table 1.1 保障措置上の有意量

	物 質	保障措置の有意量 (S Q)	S Qの適用 対 象
直 接 使 用 物 質	P _u	8 kg	全 元 素
	²³³ U	8 kg	全同位元素
	U (²³⁵ U ≥ 20%)	2.5 kg	²³⁵ U
	適切な混合法則で加え合わせる		
間 接 使 用 物 質	U (²³⁵ U ≤ 20%) *	7.5 kg	²³⁵ U
	Th	20 t	全 元 素
	適切な混合法則で加え合わせる		

* 天然ウラン及び劣化ウランを含む

Table 1.1 は IAEA が最近用いている有意量を示したものである。表の中の直接使用物質とは、その物質が変成とか再濃縮することなく核爆発物に転換出来るものを意味し、間接使用物質はそうでないものを意味している。

(ii) 転換時間 (Conversion Time)

これはいろいろな形の核物質を核爆発装置の金属部品に変換するのに必要な最小時間として定義されている。タイムリィ検出に関する SAGSI^{*} に於ける議論の結果、「検出時間」はタイムリネスのパラメータとして採用し、それは「転換時間」の大きさに対応させるべきだとの中間勧告がなされている。この意味で「検出時間」は想定された1回の転用と IAEA の保障措置によるその検出との間に経過する最大時間として定義される。SAGSI^{*} によって勧告された転換時間は Table 1.2 に示すような値となっている。

(iii) 転用の仮定

IAEA によって考えられる転用の仮定は次の2つである。

そのひとつは、保障措置下にある核物質を、少なくとも1箇の核爆発装置へと変換するため

* Standing Advisory Group on Safeguards Implementation : IAEA の Director General に対し、保障措置実施の技術面に関して勧告をする国際専門家グループ。

Table 1.2 転換時間

物質の分類	当初の物質形態	最終形態	推定転換時間
1	P_{235} , HEU*, 或は U-233 金属	成形加工した プルトニウム 或はウラン部 品	7~10 日程度
2	$P_{235}O_2$, $P_{235}(NO_3)_3$, 或は他 の純粋化合物, HEU 或は U-233 酸化物或は他の純粋 化合物	"	1~3 週間程度
	MO_x 或は他の非照射純粋混 合物を成すプルトニウム或は ウラン〔(U-233+U-235) $\geq 20\%$ 〕 P_{235} , HEU 及び/或はスク ラップ内の U-233, 或は他 の種々の不純化合物	"	"
3	P_{235} , HEU あるいは照射燃料 中の U-233 (2.1×10^5 Ci/kg HEU 或は U-233 或は P_{235})	"	1~3 ヶ月程度
4	20% U-235 及び U-233 以下のウラン	"	1 年程度

* 20% U-235 以上のウラン

に行なわれる Abrupt diversion 乃至は Prompt Conversion に基づくものである。この可能性に対抗するために、保障措置下の核物質に対し、IAEA はその推定転換時間に対応した頻度で査察活動を実施する。

他のひとつは、起りうると考えられる最小の転用率に基づくものである。検出されるのを防ぐために、長期間に亘って少量の核物質を組織的に転用する場合はこれに対応する。この protracted diversion に対抗するためには、起りうると信ずるに足る最少の転用率を定義することと、そのような最少率以上の転用を検出するための高感度試験を実施することが要求される。国際保障措置の観点からすると、核の拡散という状態は1箇の核爆発装置が獲得された時に発生するものと仮定してよからう。この場合の、保障措置の目標は、1箇の核爆発装置を

作するのに必要な量を1年間で転用する場合を対象とし、最少限度の核物質が転用されるとき、それを高い信頼度でもって検出することにある、といえる。

(V) 転用モードとシナリオ

国によっては多種類の多数の核物質取扱い施設を運転しているが、それらはそれぞれが潜在的転用の源として働くこともあれば、何処かの転用源を隠蔽するために妨害センターとして働くこともありうる。

ある国中の転用のパスは、施設の特性に依じて多数存在しうる。同じタイプの施設が重複して存在すれば、それだけ転用パスの数は増大することになる。このような施設間の転用パスに対抗する手段は、S/RDの適切な分析評価と、封印監視を強化したC/Sに強く依存しなければならぬまい。

1.2.2 保障措置戦略

(i) 目標量 (Goal Quantity) と、その検出についての要件

大型施設の場合 Throughput が大きい為とその物質収支期間の計量誤差 - 謂ゆる σ_{MUF} - が「有意量」を越えてしまうことがある。このような場合、物質収支の計量誤差の中で有意量の転用が可能ということになって仕舞う。このような状況の発生を防ぐためには、物質収支期間中の流量を少なくするために物質収支期間を短くするとか、インベントリーを少なくする為にMBAを増やすとか、あるいは測定精度の向上を計るしかないと考えられていた。

又、物質収支ではデータの収集と分析に比較的長い時定数があるので、ある物質の転換時間が非常に短いとすると、要求される検出時間は非常に短いものになり、現実的でなくなる懸念もある。

このような問題を解決するために、いろいろの代替案が考えられているが、その代表的なものは封じ込め監視の強化と有効利用のカテゴリーに入るものと、near - real - time 物質計量管理のカテゴリーに入るものに分けられよう。

但し、後に述べるように、遠心法のように系のバランスの時定数の短いシステムに対しては、near - real - time 物量管理の方法にも限界がある。

(ii) 基本的戦略 - 遠心法の場合

あらゆるタイプの濃縮施設に対して、ひとつの基本的戦略を立てるということは不可能である。又、同一のタイプの施設の場合でも、その規模によって、既に述べたような転用戦略に相違が出て来るので、やはりひとつの基本的保障措置戦略を立てるわけには行かない。しかし、あるひとつの施設に対して戦略を立てれば、それは他の類似の施設に適用すべき戦略を立てるのに大変有用である。

ここでは、ウレンコ遠心分離施設に対して考えられた保障措置の基本戦略を箇条書きの形で示すことにする。他の遠心分離施設に対しては、ケース・バイ・ケースで戦略を立てる必要がある。又、ガス拡散プラントの場合、現在この施設をもっているのは核兵器保有国のみであり、その施設はNPT保障措置の対象外であるので、ここでは考察から外すことにした。

Table 1.3 は、ウレンコ施設の仮想的物質収支を示したものである。

この施設の設計は、カスケードそのものに関する限り十分な封じ込めが成り立っているが、

カスケードの外では比較的自然的な封じ込めは少ない。このため保障措置戦略としては主に物質計量会計に依存したものを採用することになる。

次のような原則が本質的なものと考えられる。

- a) 施設者の計量会計データの査察官による独立検認。
- b) 査察官に対して、知識の連続性を保証すること、その中には以下を含む。
 - イ) 保障措置に関連するすべてのデータへの定常的な接近。
 - ロ) 保障措置に関連するデータを検認する機会。
 - ハ) 適切な封じ込めと監視手段の適用。
- c) INFCIRC/153^{*}, 46条(b)(iv)項に従う立入拒否区域として設計されたところを除く施設のすべての場所への定常的な査察官の立入り。特に、立入拒否区域と指定された区域のすべての境界への定常的な査察官の接近。
 - 濃縮施設の計量会計による保障措置は転換施設のアウトプットでUF₆を検認することから始める。そこでは、後で再検認の必要性を減らすために適切なシールをほどこす。原料のUF₆が濃縮プラントに到着したとき、それが到着以前に検認されていないときは到着したところで検認する。
 - 原料貯蔵庫からプロセスMBAに移されたシリンダーは、カスケード供給ポイントに連結されるときに検認する。シリンダーの大部分はシールされたままでこのポイントに到達するから、このポイントでの検認はほとんどアイテムの同定とデータ・オーディットになる。
 - UF₆のティルと製品の入ったシリンダーはすべて同定とデータ・オーディットで検認し、それがプロセスMBAを離れるときは必ずシールをする。製品シリンダーは定量的検認のために全数サンプルする。ティルシリンダーは100%ベースで重量測定をした後シールをする必要があるが、場合によっては準ランダム・ベースでサンプルすることもある。
 - 廃棄物、装置からの洩れ、汚染機器の取り外しなどのような微少な流れには慎重な注意を要す。これらの流れについても、それらが転用を隠蔽する仕かけとして使われないようにするために場合によっては検認を必要とする。
 - 査察官の自由接近区域における実在庫検認は単純なものにする。在庫の大部分はシールされたシリンダーの中にある筈で、その検認は従って主としてそのシールの完全性を管理することになる。当然ここでは多数のシールが用いられることになるから、それらの連続的な同定記録の保持には慎重でなければならぬ。
 - マイナー・アイソトープ比及びマイナー・アイソトープの物質収支は、物質計量会計の補足になるものとして使用する。尚、この技術の感度は未だ必ずしもはっきりとは判っていないが、これが用いられれば潜在的転用意図者にとってはあらたな制約となるだろう。
 - 立入拒否区域へ通じるすべての入口は、それが人用であるか機器搬入用であるかを

* NPT保障措置のモデル協定案

Table 1.3a Hypothetical Material Balance Urenco Model. 200 t/a SW

	Number of Items	%U-235	(kgs)		Combined Uncertainty, in kgs U-235								
			U	U-235	random weighing	systematic weighing	random analytical	system analytical	random isotopic	systematic isotopic			
Beginning Inventory			0	0									
Receipts													
UF ₆ (natural)	66	0.711	555 000	3 946	±0.488	negl.	± 0.244	± 3.965	± 0.244	± 3.965	± 0.244	± 3.965	
Total Receipts			555 000	3 946									
Shipments													
UF ₆ (product)	55	3.100	81 000	2 511	±0.842	negl.	± 0.171	± 2.536	± 0.171	± 2.536	± 0.171	± 2.536	
UF ₆ (tails)	57	0.300	473 850	1 421	±0.191	negl.	± 0.096	± 1.445	± 0.096	± 1.445	± 0.096	± 1.445	
Total Shipments			554 850	2 932									
Discards			150	14	?								
Ending Inventory			0	0									
MUF			0	0									

Note: Figures 3a and 3b of necessity contain many assumptions, both concerning the projected manner of facility operation and concerning the statistics of error propagation. More exact calculations based on actual facility operations should be performed by the inspectors involved.

Table 1.3b Hypothetical Material Balance Urenco Model, 3000 t/a SW

	Number of Items	%U-235	(kgs)		Combined Uncertainty, in kgs U-235							
			U	U-235	random weighing	systematic weighing	random analytical	systematic analytical	random isotopic	systematic isotopic		
Beginning Inventory			0	0								
Receipts												
UF ₆ (natural)	675	0.711	5700 000	40 527	± 15.61	negl.	± 0.781	± 40.554	± 0.781	± 40.554	± 0.781	± 40.554
Total Receipts			5700 000	40 527								
Shipments												
UF ₆ (product)	561	3.100	834 000	25 854	± 1.092	negl.	± 0.546	± 25.864	± 0.546	± 25.864	± 0.546	± 25.864
UF ₆ (tails)	575	0.300	4850 000	14 550	± 0.608	negl.	± 0.304	± 14.576	± 0.304	± 14.576	± 0.304	± 14.576
Total Shipments			5684 000	40 404								
Discards			16 000	123								
Ending Inventory			0	0								
MUF			0	0	± 71.1kgs U-235 = ± 0.28% of U-235 product shipped							

Note: Figures 3a and 3b of necessity contain many assumptions, both concerning the projected manner of facility operation and concerning the statistics of error propagation. More exact calculations based on actual facility operations should be performed by the inspectors involved.

問わず、シールをし、監視する。機器搬入ドアは査察官立会いの下においてのみシールをほどこし、かつ開放することが出来るようにするのが望ましい。人間用の入口はもっとやっかいな問題となる。というのは、人の通過に必要な時間は極く短かく、かつU-235から放射されるガンマ線は比較的弱いので検出には高感度が要求されるからである。

- なお一般にUF₆のシリンダーの出入りを監視して、封じ込め/監視(C/S)の効果を挙げることは、シリンダーそのものが、大型であるだけに、比較的容易である。秘密カスケードがあって、高濃縮ウランが作られていると仮定した場合のC/Sについては、1.4で述べる。

(iii) 物質収支区域の選定

物質収支区域の選定は次の条件を満足するように決めることが大切である。

- ★ 物質収支の計量の正確さを充分維持出来るような領域とする。
- ★ 封じ込め及び監視(C/S)のメカニズムが物質収支及び核物質の流れの検認を容易にしうようにすること、即ち、物質収支区域の境界は物理的封じ込めを伴うことが望ましい。
- ★ 原料、製品、ティル及び保守用区域は別々の物質収支区域とする。これは秘密カスケード使用に対する抑止効果をもたせるためである。
- ★ (ii)で述べた基本的戦略を可能とするもの、

ウレンコ施設の場合、Fig.1.3に示すようなMBAが考えられているが、これは上記の諸条件を満たしている。各MBAは以下の特性をもつ。

MBA1 - UF₆の受け入れ区域で、受け入れ測定と貯蔵を行なう。

MBA2~7 - 濃縮カスケード、これらの区域には、UF₆原料供給連結部及びプロダクトとティルの凝縮器を含む。MBA境界の定義は慎重に行なうべきで、適切な入・出量測定が可能にすると共に、カスケードの運転には直接関係のない貯蔵や操作は一切排除出来るように心を配らなくてはならない。

MBA8 - UF₆ティルの貯蔵区域

MBA9 - UF₆プロダクト貯蔵と払い出し区域

MBA10 - 保守及び廃棄物貯蔵区域

ウレンコ施設は小規模施設の方で200 t/a SWの規模をもつが、例えば西ドイツで考えている施設は3%U-235の濃縮目標で59 t SWU/aの規模であり、PNC人形峠の施設は同様濃縮度で50 t SWU/aというパイロット・プラントであり、かなり小規模である。

MATERIAL BALANCE AREAS

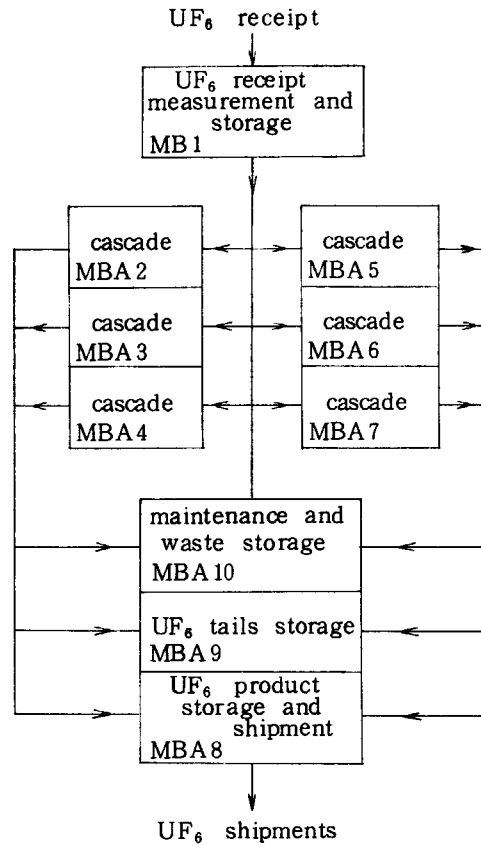


Fig.1.3 ウレンコ濃縮施設におけるMBA

これらの施設で提案されているMBA区分例を Fig.1.4 に示す。これらの施設に於ける提案は必ずしも前記の条件を満足していない。これらがパイロットプラントである事によろうが、今一度、既述の保障措置の基本戦略が実施可能かどうかを検討すると共に、本施設に於ける転用戦略について考察し、保障措置の基本戦略を再考し、それに合わせてMBA の設定を考え直してみる必要がある。

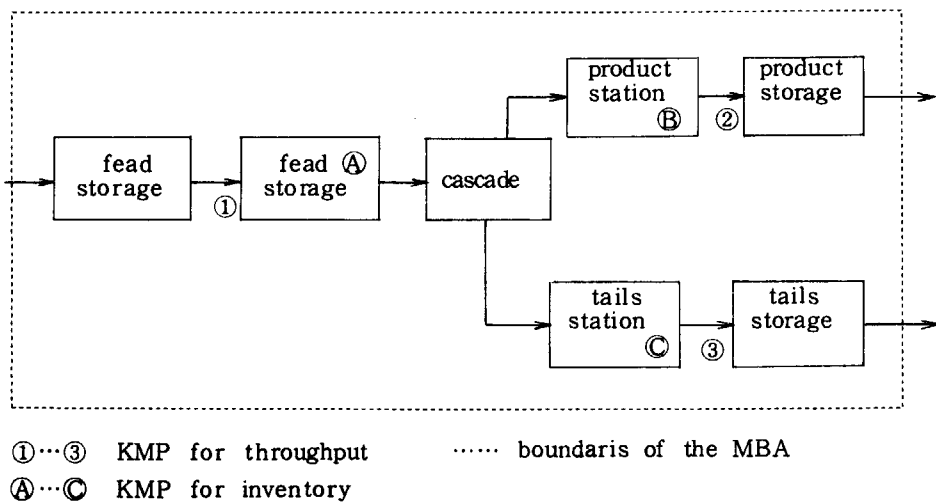


Fig.1.4 西独濃縮プラントのMBA及びKMPの提案

1.3 計量管理とその検認

1.3.1 設計情報とその審査

- ・設計情報の審査は、既述したような保障措置の基本的戦略が実施出来ることを確認し、場合によっては保障措置戦略上何らかの変更が必要であるかどうかを審査する目的で行なう。
- ・シールの査察官による検認方法、シールされていない原料の測定と査察官による検認が出来る手続きを確立すること。
- ・査察官の立入拒否区域への出入方法を同定し、記録する。基本戦略で述べたように、此の区域へのすべての出入口はシールされ、監視されているものと仮定しているが、その仮定の妥当性を検認する。
- ・カスケード区域を貫通するすべての配管系統などは、これを同定し、検認する。
- ・貯蔵区域に置かれるシリンダーのシールの検認を妨げないような貯蔵方法が確立されている事を確認する。
- ・棚卸しの手続きの審査
- ・計量体系と計量誤差の妥当性の検査

1.3.2 冒頭報告の検認

- ・査察官の立入拒否区域内の在庫を直接検認することが出来ないので、施設者が冒頭実在庫を検認する手続きを観察し、監視する事が必要である。
- ・立入拒否区域外の在庫については、そのMBA 外で査察官によるシールが施されている場合にはその同定検認を、シールされていないのは再秤量を行なう。
- ・冒頭報告の場合、以前の転用を隠蔽するために在庫量を過大申告するというようなことは無いことに注意する必要がある。そのような転用は、仮にあっても検出不能であるし、協定の立前から云って施設者にはその必要もない。
- ・一方、将来の転用に備えて現在の（冒頭の）在庫を過少申告したいということは、転用の意図があればありえないことではない。このような場合、査察者は、在庫が常に無く大きいということより、むしろ異常に少ない在庫の方を余計に注意しなくてはならぬ。

1.3.3 記録の照合検査

濃縮施設における記録の照合検査は、他の通常の施設のそれと殆ど変わるところはない。ただ、濃縮施設は既述のようにシール、モニタリング等が多用されているので、その検認のための照合検査が多くなる。このため、その適切な手続きの確立が重要である。

1.3.4 流れの検認

(i) UF₆ の受け入れ

シール付でUF₆ シリンダーが到着する場合は、100% ベースでその検認を行なう。シールなしで到着する場合は、到着時点で、重量測定をし、シールを施す。又、その場合には同位体比測定用のサンプルを適切な時と場所で採取し検認する手続きを確立する。

(ii) UF₆のプロセスMBAへの移動

- ・あらゆるシリンダーの移動は100%ベースで封印の検認を行う。
- ・封印のないシリンダーは移動してはならない。移動前に再秤量、定量的検認、シーリングを行なう。

(iii) UF₆プロダクトのプロセスMBAからの取出し

- ・UF₆プロダクトのプロセスMBAからの取出しについては注意が必要である。申告しているシリンダー以外のシリンダーにプロダクトが充填されないような査察手順が必要である。そのような手順としてウレンコ施設の場合には以下のような手順が考えられる。

- プロダクト・シリンダーの空重量を観測（検認）し、シリンダーの凝縮器マニホールドへの連結部にシールを施す。日付、シリンダーの番号と空重量及びシール番号を記録に止める。
- シリンダーが充填されている場合は元のシールが破壊されていない事を観察し、その日付とシール番号を記録に止める。
- 施設者のシリンダー内UF₆の均質化の手順を観察し、査察者の定量的検認のためのサンプルを採取する。
- 施設者の実施するグロス重量の測定を観察し、検認する。
- UF₆の充填が終ったシリンダーにシールを施し、関係のあるすべてのデータを記録に止める。
- SAM-II方式によって概略の濃縮度を測定する。

(iv) UF₆ティルのプロセスMBAからの取出し

- ・定常運転で施設者はティルの濃縮度測度のためのサンプリングを定常的には行なわないことが多い。この場合、査察者は、止むを得ず施設者のサンプリング時点に合わせて査察用サンプルを採取せざるを得ないが、ティルの戦略的価値からして、このような方法を採用しても大した問題にはならない。
- ・すべてのティルシリンダーのグロス重量は、施設者自身が行なう測定を観察することによって検認し、シールする。ただし、仮に重量測定がなされなくてもシールだけは施す。これは新しく取り出したシリンダーと偽って何度も同じティルシリンダーを見せられるのを防ぐためである。

(v) UF₆ティル及びプロダクトの払出し

- ・すべての払出しはシールされたシリンダーによるから、その検認を100%ベースで行なう。

(vi) プロセスMBAから他のものの取出し

- ・化学的トラップの交換に付随するウランの量及びその濃縮度を検定する。これはMUF検定の重要な資料となる。

1.3.5 実在庫の検認

- ・在庫の殆どはシール付であるので、その検認を100%ベースで行う。
- ・カスケード内のインベントリィは、フィードシリンダーが空になるのを待って、プロダク

トとティルシリンダーを同時に取外して計量する，というような便法を考えなくてはならない。

- ・シールされていないアイテムは，それがあまり多数でない限り，100%ベースで計量・検認すべきである。

1.4 秘密カスケードの検出と防止の戦略

以下の如く2つの方法が考えられるが，その実現可能性，経済性，実効性など，未だ充分検討しているものではない。ここでは，アイデアを示す程度にしておく事にする。

1.4.1 立入拒否区域の排除

技術の公開を求める必要は毛頭ないとしても，更に査察員の立入りを拒否するような区域が必要かどうか，今一度考え直してみることが大切である。これの排除は，保障措置の飛躍的改善になることを考える必要がある。又，商業秘密上，査察官に見せたくない部分のみをカバーし，配管などの保障措置上の情報を全て公開するようなプラントの設計は十分可能であると考えられる。ノズル法のプラントでは立入拒否区域がなく，公開度が100%であってSafeguard-abilityが非常に高い事を考えれば，遠心法のみが商業機秘を盾にとって，いつまでも立入拒否区域の設置を主張し続けられるか，はなはだ疑問である。

仮に，上記したようなカバーによる部分的目隠し法が採用可能であるとしたときには，しかし，査察官が同種施設を保持している国の者に限るという条件は，国際保障措置の実施上で，明文化する必要があるかも知れない。

1.4.2 動的計量管理・適用による保障措置の改良

カスケード内のダイナミックな計量管理が比較的容易である場合，すなわち拡散法，化学法のように系の時定数が長い場合には，この方式によってanomalyの存在を検認することを考える。MISTも同様な条件の下では有効である。このことは概念的に明白であるが，遠心分離法による濃縮プラントに対する動的計量管理の適用も有効であると考えられる。これについてはもう少し詳細な検討を第2章で行なう。

1.4.3 封じ込め/監視の強化による保障措置の改良

- (1) 封じ込め/監視(C/S)の強化は濃縮工場全体に対する保障措置手段として有効であることは言うまでも無い。特にUF₆のシリンダーは大型であるので先にも述べたように不用の出入口の閉鎖とカメラ，ITVによるパターン認識などの一般的方式が採用されねばならない。
- (2) 秘密カスケードが存在して高濃縮ウランが生産されていると仮定した場合には，大規模なプラントの中の小規模秘密カスケードを計量管理のみで発見することは不可能である。結局，それがUF₆の形で持ち出されることを考えると，当然特殊な小型シリンダーが秘密裡に持出されることになり，これに対して有効なC/Sを準備することが有効である。遠

心分離工場における秘密カスケードとして特殊な方形カスケードが考えられるが、これに対応するためにはこのようなC/S方式が有効であると考えられている。これは遠心分離法による系の時定数が極めて短いため計量管理が有効でない場合が存在し、しかし逆にインベントリーが少ないために有意量の高濃縮ウランの生産には長時間を要するという特色から来ている。上記の高濃縮UF₆用シリンダーの持ち出しは、プルトニウムの秘密持出しに対するC/Sよりは楽な筈であり、なお、UF₆からたとえば金属、酸化物などの形に変形して少量ずつをシリンダーによらずに持ち出す可能性に対処するには、そのような変換施設の秘密な存在を検証すれば良いであろう。

2. 動的計量管理による改良の可能性の検討

濃縮プラントにおける保障措置上の最大の問題は、「カスケードの悪用による転用」を検出する有効な戦略が未確立であることにある。1.4節ではそのような戦略のアイデアを提示したが、本章では、これらのアイデアの内、動的計量管理法の適用による改良の可能性について半定量的な検討を加えてみよう。動的計量管理を採り上げたのは、再処理施設に対する同管理法の適用性の研究に関する最近の成果から、当初予想していた以上に動的計量管理法が保障措置上有効であることが判って来たからである。この方法を採用した場合、カスケードホールを立入禁止区域のまゝにしていたとしても、ある種の動的な工程内の情報を用いることにより秘密カスケードの存在を知ることが可能かも知れないという僅かながらの望みが出て来たといえる。このことを定量的に検討し、確認するためには、後に述べるように、再処理施設に対してTASTEXプロジェクト^{*}で実施したような大規模なシミュレーション・スタディを行なわねばならない。そのような目的に用いるためのコード開発は昭和54年度の「濃縮保障措置委員会（核管センター）」の場において、その一部を開発したが、本格的開発は今後の仕事である。

本章では、まず動的計量管理と静的計量管理の相違について説明し、次に動的計量管理の数学的モデルを検討する。これは必ずしも完全なものではないが、現段階における考察を基盤としたものである。次いで、そのような動的計量管理を実際の施設に於て実現する為のプロセスとしての設計法を概説する。2.2節では、モデルとして考えた遠心分離法による濃縮施設で静的計量管理のみに依った場合の限界を示し、2.3節では、動的計量管理を導入すれば、その改良の可能性はどのようなものであるかを定性的に検討する。又、定量的に検討する為今後開発しなくてはならないシミュレーション・システムの基本構想を提示する。

2.1 動的計量管理と静的計量管理^{*}

2.1.1 静的計量管理の概念と問題点

核物質の計量管理システムには一般に次のような3つの機能が備わっていないとてはならない。

- 1) 核物質の測定を含めたデータの収集
- 2) 転用検出を目指したデータ解析
- 3) データの報告

これらの機能の基本となる作業は、プラントの周期的停止、クリーンアウト、そして実在庫測定（PIT）とそれに続く物質収支勘定である。

静的計量管理では、この物質収支はプラント全体ないしはプラントの主要工程の部分についてとられており、以下の式を解くことによって得られる。

* 静的計量管理とは、現在用いられている（conventional）計量管理方法を意味する。

$$\text{物質収支} = \text{MUF} = \text{BI} + \text{R} - \text{S} - \text{MD} - \text{EI} \quad (2-1)$$

ここで

- MUF = 不明物質質量
- BI = 期首在庫量
- R = 受入れ量, 核的生成量他
- S = 払出し量, 核的損耗量
- MD = 測定済廃棄物質量
- EI = 期末在庫量

この方程式は通常, 3~12ヶ月という比較的長期の全ての受け入れ, 払い出し, 及び廃棄物を測定することによって解かれる。もちろん全てといっても直接測れないものもあり, 間接的な測定量から推定することになる。保障措置の計量管理上はこれも“測定”したものととして取り扱う。MUFの測定誤差の範囲は, これを分散で表現すると

$$\sigma_{\text{MUF}}^2 = \sigma_{\text{BI}}^2 + \sigma_{\text{R}}^2 + \sigma_{\text{S}}^2 + \sigma_{\text{MD}}^2 + \sigma_{\text{EI}}^2 \quad (2-2)$$

となる。このとき有意水準 (あるいは第一種過誤) を α とすると, MUF が正規分布に従うものとしたとき誤差の限界 LEMUF は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \text{LEMUF} &= Z_{1-\alpha/2} \cdot \sigma_{\text{MUF}} \\ &\doteq 2 \cdot \sigma_{\text{MUF}} \quad (\alpha = 5\% \text{ のとき}) \end{aligned} \quad (2-3)$$

MUF が単純に測定誤差から構成されているのであれば, その期待値は零である。従って, 転用やロスなどが無いと仮定したとき, 観測された MUF 値は (MUF_0 で表わす)。

$$-\text{LEMUF} \leq \text{MUF}_0 \leq \text{LEMUF} \quad (2-4)$$

の間にある筈である。MUF₀ は, 平均値が零であるような MUF の母集団からの実現値であると判断しても 95% の確かさで正しいといえ, MUF₀ は統計的に零であると判断することになり, 保障措置上の結論は 転用はなかった ということになる。(Fig. 2.1)

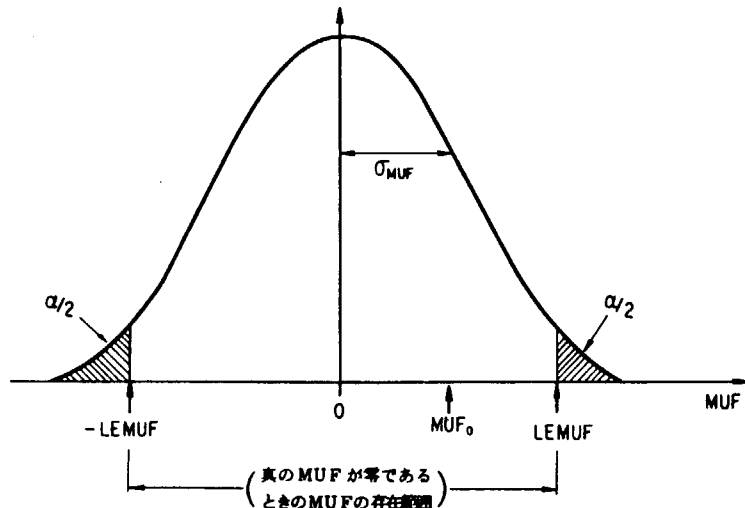


Fig. 2.1 MUFの観測値 MUF₀ が -LEMUF と LEMUF の間に在れば, それは統計的に零であると判断される。

一方、 MUF_0 の絶対値が $LEMUF$ の絶対値を越えた場合にはそれは統計的に零ではないと判断される。その判断が誤りである確率は5%である。このとき、この MUF_0 は、平均値が MUF_0 であるような MUF の母集団からの実現値であると見直される。(Fig. 2.2)

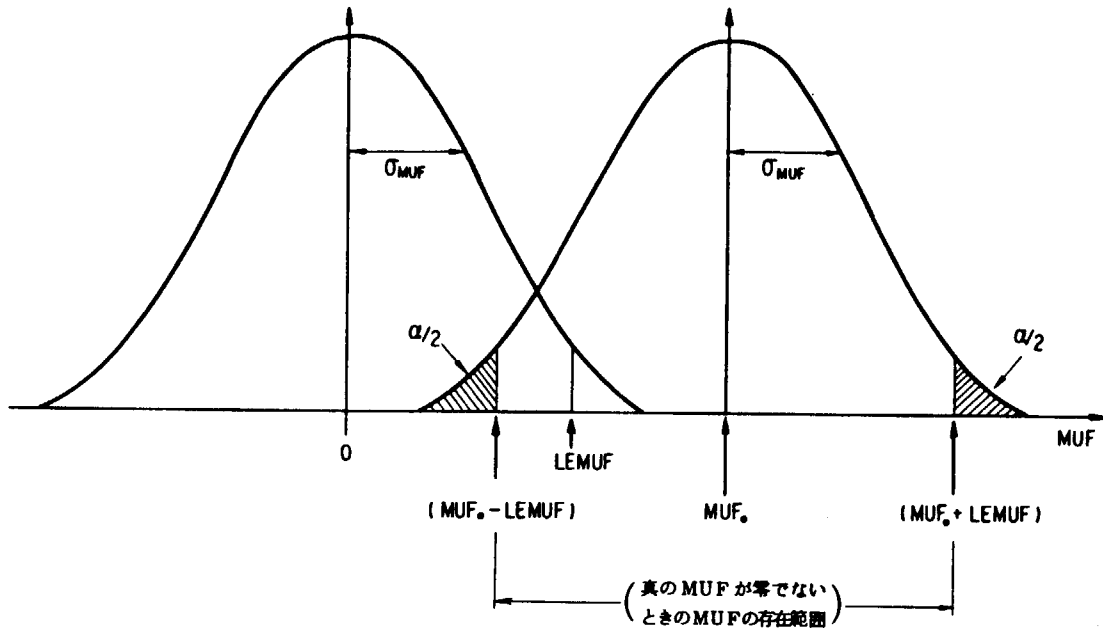


Fig. 2.2 MUF の観測値 MUF_0 が $LEMUF$ を越えたことにより統計的に零と判断されなかった場合には、この MUF_0 は MUF_0 を平均値とする MUF の母集団からの実現値と見直される。このとき真の MUF 、 MUF_t は $MUF_0 \pm LEMUF$ であると判断される。

この場合、観測値 MUF_0 の 95% 信頼区間の形で真の MUF の存在範囲は

$$MUF_0 - LEMUF \leq \text{真の } MUF \leq MUF_0 + LEMUF \quad (2-5)$$

であると判断される。

MUF_0 が零でないと判断されても、それが直ちに保障措置上問題になるわけではない。問題になるのは、 MUF_0 が保障措置上「有意である量」を越えた時であって、そのような量は統計検定とは無関係に、あらかじめ別途約束される「保障措置有意量」あるいは単に「有意量(SQ)」と呼ばれている。

保障措置上の判断は

$$MUF_0 - LEMUF \leq SQ \leq MUF_0 + LEMUF \quad (2-6)$$

の場合、測定誤差だけでは説明のつかない SQ の量の MUF が発生した、という判断となり、

$$SQ < MUF_0 - LEMUF \quad (2-7)$$

の場合、測定誤差では説明のつかない SQ を越える MUF が発生した、とされ、その判断が誤

りである確率は2.5%以下ということになる。このような静的計量管理は、現在の国際保障措置システムの中で不可欠の重要性を持つが、同時に静的計量管理が故に転用検出の感度と適時性について限界ももっている。感度に関する限界は計量の不確かさに起因し、適時性に関する限界は実在庫測定(PIT)の頻度に関する制約に起因する。

物質収支の計量精度に対してIAEAが期待している値 (Table 2.1) はPITの頻度と転用

Table 2.1 物質収支の期待精度 (標準偏差) の施設者及び査察者の現実的な目標量 (Goal Quantity) - 処理量ないし在庫量の%値

施設の種類	IAEAが施設に対して適用するもの			国が施設に対して適用すべきとIAEAが期待するもの		
	σ_{MUF} に対するIAEA期待精度	施設者の検出目標 M_0	IAEA査察者の検出目標 M_1	σ_{MUF} に対する国の期待精度	施設者の検出目標 M_0	国の査察者の検出目標 M_1
ウラン濃縮施設	± 0.2	0.7	1.0	± 0.1	0.3	0.5
ウラン燃料加工施設	± 0.3	1.0	1.5	± 0.25	0.8	1.3
プルトニウム燃料加工施設	± 0.5	1.7	2.5	± 0.25	0.8	1.3
動力炉 (ウラン)	± 0.2	0.7	1.0	± 0.1	0.3	0.5
動力炉 (プルトニウム)	-	-	-	-	-	-
再処理施設 (ウラン)	± 0.8	2.6	4.0	± 0.25	0.8	1.3
再処理施設 (プルトニウム)	± 1	3.3	5.0	± 0.5	1.8	2.5
非照射スクラップ再成施設	± 2	6.6	1.0	± 0.3	1.0	1.5
貯蔵施設	-	-	-	-	-	-
研究・開発施設	-	-	-	-	-	-

(注) $M_0 = 3.29 \sigma_{MUF}$, $M_1 = 5 \sigma_{MUF}$

の検出時間を決めるクライテリアとなる。(Table 2.2) これらの数値を用い、本研究で対象とした参考濃縮工場に静的計量管理法を適用した場合、どのような問題が出て来るかについては、2.3節で具体的に述べるが、要約すれば以下のようなものである。

- (i) Table 2.1 の σ_{MUF} の値は物質収支区域及び期間に対して定義された相対値である。従って、それらの大きさによっては $LEMUF (2 \cdot \sigma_{MUF})$ の絶対値が有意量を越えてしまうこともある。
- (ii) 物質収支期間は、Table 2.2 にあるような頻度からすれば、3～12ヶ月の間ということになる。3～6ヶ月毎にMUF方程式が解かれ、その有意性が判定される。従って、物質収支期間の初期に転用があったとすれば検出のための情報入手が遅くなる。
- (iii) しかるに同じTable 2.2 の中に検出時間は1～3週間と規定されている。これは静的計量管理のみの保障措置手段では達成しえないクライテリアである。
- (iv) 参考濃縮工場の場合、プロダクトは3%濃縮度で700 mt U/a で、 ^{235}U に換算すると21 ton ^{235}U /a となる。6ヶ月毎にPITをする場合、1物質収支期間 (MBP) あたり10.5

ton²³⁵Uとなり、 σ_{MUF} の期待精度はこれのほぼ0.2%であるから

Table 2.2 保障措置クライテリア

施設タイプ	核物質タイプ	検出時間	PIT頻度 (回/年)	査察モード
原子炉	NU, LEU	1年	1	間欠的に
	照射燃料中のPu	1~3ヶ月	1	4~6回/年
	新燃料中のPu 或は HEU	1~3週	1~4	間欠的に2~3週間ごと
臨界施設	Pu/HEUの純粋化合物	1~3週	1~4	連続的,あるいは2~3週間毎
	Pu/HEU金属	1~10日	1~4	連続的,あるいは各週毎
貯蔵施設	NU, LEU	1年	1~2	間欠的に1~2回/年
	Pu/HEUの純粋化合物	1~3週	2~4	間欠的に3週毎
燃料加工及び転換	NU, LEU	1年	1~2	間欠的
	HEU, Puの純粋化合物	1~3週	2~4	連続的ないし2週毎
	HEU, Pu金属	7~10日	2~4	連続的ないし毎週
再処理施設	LEU, NU, DU	1年		全プラントに対して連続的
	照射燃料中のPu	1~3ヶ月		
	工程中のPu	1~3週		
濃縮施設	LEU	1~3週	2~4	間欠的から連続的まで

LEU : 20%以下の低濃縮ウラン

$$\sigma_{MUF}^{\Delta} \approx 10.5 (\text{ton}^{235}\text{U}/\text{MBP}) \times 0.2\%$$

$$= 21 \text{Kg}^{235}\text{U}/\text{MBP}$$

$$\text{LEMUF} = 42 \text{Kg}^{235}\text{U}/\text{MBP} (\alpha = 5\%)$$

である。20%濃縮以下の低濃縮ウランの有意量は75Kg²³⁵Uであるが、いわゆる Protracted Diversion で年間75Kg²³⁵Uの累積量になるようにするとLEMUF以下になってしまう。

- (M) この場合、物質収支期間を6ヶ月よりも小さくするか、物質の Throughput を減らすために工程を平行な幾つかの流れに分離してそれぞれを独立のMBAとするか、或は計量精度を飛躍的に増大させるか……などの対策を立てる必要があるが、それでもタイムリー検出にはならない。

2.1.2 動的計量管理の概念と問題点

動的計量管理は静的計量管理の限界である転用検出感度と検出のタイムリネスを改善するために考えられているので、動的物質収支方程式が比較的短期間毎に解かれることになる。これは次式で表わされる。

$$MUF_d = B I_d + I_d - P_d - T_d - W_d - E I_d \quad (2-8)$$

ここで

$B I_d$ = 動的物質収支期間の期首に測定された動的在庫で、前期の期末実在庫と完全に同

一のもの

I_d = 動的物質収支期間中に測定されたフィード・バッチ (シリンダー)

P_d = 同上期間中に測定されたプロダクト・バッチ (シリンダー)

T_d = 同上期間中に測定されたテイル・バッチ (シリンダー)

W_d = 同上期間中に測定された廃棄物バッチ (シリンダー)

$E I_d$ = 同上期末に測定された動的実在庫

MUF_d = 動的物質収支の値 (MUF) . この中には動的実在庫の中で未測定部分の変動分を含む

動的実在庫にはMBA内のすべての実在庫を含める事は必ずしも無く、主要な在庫のみを含むようにし、僅かな量しか含まない部分は意識的に落として、測定を容易にする配慮がされる。ただし、未測定部分の総量が MUF_d の統計分析の感度に見逃されることがないよう注意する。例えばカスケード内の実在庫量はプラント全体の実在庫量に比べるとごく僅かであるが、仮に運転単位毎に MUF_d を算出するとすれば、物質収支期間の長さによってはこの在庫量は無視出来ぬ効果を統計分析に及ぼすかも知れない。そのような場合には、この測定困難なカスケード内の実在庫は、コンピュータのシミュレーション技術によって推定するのがよいかも知れない。これは丁度、再処理工場における動的計量管理でMixer - Settlerの在庫量に対して行なおうとしていることと同じである。Mixer - Settlerの場合、内部で進行する化学反応をシミュレートするのに多数のパラメーターを必要とするので、可成り難しいコードの開発が必要であったが、遠心分離プラントのカスケード内のシミュレーションについては、比較的容易にコードの開発が出来ると考えられる。

動的物質収支を採る期間はTable 2.2より1~3週間が適当であろう。勿論、プラント側でそのような測定が可能ならばという条件付でこれは実質上極めて重要な制約要因である。再処理工場の場合、動的物質収支の期間は7日(1週間)である。つまり、7日毎に工程内の主要タンク内の溶液の体積を測り、化学分析の為のサンプリングを行なう。このサンプルの分析はWet chemistryで行なわれるが、サンプル採取後、ほぼ2日間で分析結果が得られる。これによって MUF_d の方程式を解き、さらに、それ以前の MUF_d との相関々係に注目した形でその有意性の解析を行なう。このために1日を要するとして、合計10日間で転用の有無に対する判定を下す。このような動的計量管理のシステムを、10-day-detection-time-modelと呼んでいるが、濃縮プラントにも、それに適した動的計量管理モデルが存在出来る筈である。動的計量管理の概念で重要なことは、以下の諸点である。

- (i) MUF_d の値そのものの重要性よりも、時系列として累積して来る多数の MUF_d の変動傾向が重要である。
- (ii) したがって動的計量管理の基本的に重要な事項は、そこで採用されている統計分析の技術である。
- (iii) 動的計量管理では測定のシステムティック・エラーの取扱いが最も重要である。従って機器の校正頻度はこの管理システムの能力を決める重要な因子である。
- (iv) 従って、長期システムティック・エラー(バイアス)を調整するために、クリーン・アウトをベースとする静的計量管理による補完が必要になる。

以上の機能面の諸点に加え、それを適用する面での重要事項も以下のようにある。

- (M) 動的計量管理では統計分析を行なうためにコンピューター利用が欠かせない。逆にコンピューター利用により、測定分析のオンラインによるリアルタイム化が計れ、又、その他プロセスモニター系のデータ等もフルに活用して総合的なシステムに作り上げることが可能となり、これはプラントの運転側にとっても有用なシステムとなりうる。
- (V) 国際保障措置システムとしてこれを利用しようとするとき、例えば、カスケード内の在庫をコンピューターでシミュレートするには、IAEA の査察官が商業上の機密データを入手せねばならぬ可能性が強まる。此の辺の問題が今後の検討課題である。
- (VI) 動的計量管理は、その導入の目的が転用の感度の向上と検出のタイムリネスの向上にある。このためには、シミュレーション技術を用いて、プラント建設前に計量管理システムの設計を行なう必要がある。その際、所要の感度とタイムリネスを確保するために、プラントの構造そのもの、測定装置と位置等、変更を必要とする場合も出て来得る。

動的計量管理と静的計量管理の特徴をまとめたのがTable 2.3である。

Table 2.3 動的計量管理と静的計量管理の対比表

	静的計量管理	動的計量管理
物質収支区域 (MBA) の設定	σ_{MUF} の大きさが throughput の 0.2 % 以下であるように採る*。 物質収支期間の長さにも依存する。 (* IAEA クライテリア)	dynamic σ_{MUF} (σ_{MUFd}) の大きさが、CUSUM法, Kalman Filter 法などの統計検定法による転用の検出能力 (時間・量) を所要の値に保つことの出来る大きさとして決められる。 物質収支期間の長さにも依存する。
KMP の 設 定	MBA への出入核物質量及び在庫量をすべて測定することが可能となるような測定点が選定される。 MBA の内部には Flow KMPは存在しない。	転用のない正常運転時の MUF_d の時間的変動と、転用が進行中である異常運転時の MUF_d の時間的変動との間の区別を、 α , β を所要の値に維持しながら可能とするような精度及びタイムリネスを満たすポイントとして定める。 従って、上記の要請さえ満たされれば、MBA への出入核物質量及び在庫量のすべてを測定する必要はない。
測 定 対 象	フィード、プロダクト、テイル、ウェィスト等、物質収支に係わる全ての核物質のバッチ重量。 サンプリングによる元素係数及び濃縮度。 (運転制御用に各運転ユニットのフィード、プロダクト及びテイルの流量が測られている。)	フィード、プロダクト及びテイルのバッチ重量及び濃縮度あるいはバッチ重量の代わりに流量と元素係数及び濃縮度。 必要に応じてウェィスト等のマイナー量も対象とする。

Table 2.3 (continued)

	静的計量管理	動的計量管理
物質収支期間	本来は動的計量管理の場合と同様の決め方が適用されるべきであるが、静的計量管理では clean out PIT を必要とし、運転への妨害度が高くなるため短期のPIT期間は採れない。 現実論から Table 2.2 の値が採られようとしている。	タイムリー検出の要求に合った期間を選べばよい。 これは、MBA の大きさ、KMP の測定精度及び仮定する転用シナリオならびに転用検出に係わるクライテリアに依存する。
物質収支の確定法	クリーンアウト後、実在庫測定を行なってMUF方程式を解くことにより物質収支が確定する。	ダイナミックな実在庫測定を行なう。(これはプラントのシャット・ダウンを必要としない。)これを用いて、ダイナミックMUFの方程式を解くことにより動的物質収支が確定する。この場合、動的物質収支の計算には含まれない僅かな工程内在庫がある場合がある。これは未測定在庫としてMUF _d の中に入れて来る。
MUFデータの解析法	LEMUF法により単期毎のMUFを検定する。 年に数個しか得られないMUFデータの間の相関は通常ほとんど無視する。	時系列データとして得られる多数のMUFデータの間の相関に注目し、逐次検定法により解析する。そのような方法として、CUSUM法、Kalman Filter法、V-mask法、Wilcoxon test法などがある。
実在庫測定(PIT)法	1) CPIT (Clean out PIT) 2) DPIT (Drain down PIT) 3) RPIT (Running PIT) 4) RBIT (Running Book Inventory Taking) がある。但し、2)~4)はIAEAによる提案の範囲のものであって、実績のあるのはCPITである。 RPIT、RBITは動的計量管理の技術としても使えるものである。	プラントを停止することなく、MUF _d への寄与の大きい部分の実在庫のみを短時間に実測ないし推定する。 全体のThroughputに比べてインベントリが僅かしかない場合、インベントリの実測は必ずしも必要でない。何らかの間接的方法による推定でも構わぬ。従って、そのような場合には、事実上PITは存在せず、物質収支は任意の時間にコンピューター上で計算出来る。

2.1.3 動的計量管理の数学的モデル

動的計量管理のもつ最大の役割は、多数の逐次観測であるMUF_dのデータを、効果的に組み合わせた幾つかの統計分析法により分析し、転用に係わる統計量を推定し、推定値の有意性を決定する、という決定分析^{*}にあるといえよう。このためには、静的計量管理で得られる在来

* decision analysis

の物質収支データでは役立つが、新しい変数として「動的物質収支」を導入しなくてはならない。

物質の計量管理の基礎は、ある閉じられた空間の中に、ある時間の内に出入した物質の量に対する連続方程式である。保障措置の計量管理では閉じられた空間がMBAに対応し、特定の時間間隔が物質収支期間に対応する。連続方程式は、1期間内にMBAに入った量と出た量の差は在庫の増加に等しいと要請することである。これを式で表現すると

$$T^a(k) = I^a(k) - I^a(k-1) \\ k = 1, 2, \dots, \quad (2-9)$$

となる。但し、

$T^a(k)$ = k番目の時間間隔の間にMBAの中に移送された核物質の実際の量

$I^a(k)$ = k番目の時間間隔の最後に、そのMBAの中に存在する核物質の実際の量

上記のaは actual value を意味する記号である。この式の中で使っている量は実際の(真の)量であって測定等に基づく不確かさを含まないものである。しかし実際には、ある種の核物質の移動はめったに観測されないか、あるいは全然観測されないこともある。例えば転用された核物質は当然、正規の移動の中には入って来ないし、系外へ洩れ出て行くようないわゆるサイド・ストリームの中の僅かな部分などもこの移送の式には載って来ない。そこで、このような移動を連続式の中で分離して表現してみると次のようになる。

$$-D^a(k) - U^a(k) + T^a(k) = I^a(k) - I^a(k-1) \quad (2-10)$$

あるいは

$$M^a(k) = D^a(k) + U^a(k) = I^a(k-1) - I^a(k) + T^a(k) \quad (2-11)$$

ここで

$M^a(k)$ = タイム・ステップkの間に、当該MBAから外に移動した未測定核物質の真の総量

$D^a(k)$ = タイム・ステップkの間に転用された核物質の真の量

$U^a(k)$ = タイム・ステップkの間にMBAの外に移動された未測定核物質の残っている真の量

上の式では $T^a(k)$ という量は、タイム・ステップkの間に当該MBAに持ち込まれた測定可能な核物質の正味の量であると再定義される。 $U^a(k)$ はm回の累積であることもあり、その場合の累積量は $\sum^m U^a(k)$ と表記するが、この量は測定されるたびに $T^a(k)$ の中に含めることも出来るし、場合によっては分離のままにしておくこともある。かくして、原理的には、(2-11)式の右辺の諸量が判り、かつ $\sum^m U^a(k)$ が決まれば、 $\sum^m U^a(k)$ が累積された期間mの間に転用された真の核物質の量が正確に判ることになる。

しかしながら実際問題としては、真の量は測定誤差の存在により知ることは困難である。測定誤差に関して、加算的誤差(ノイズ)モデルを採用して、これを考慮の上前記の量を再表現すると次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} I(k-1) &= I^a(k-1) + v_I(k-1) \\ I(k) &= I^a(k) + v_I(k) \\ T(k) &= T^a(k) + v_T(k) \\ \sum U(k) &= \sum U^a(k) + v_U(k) \end{aligned} \right\} (2-12)$$

添字 a のない量は測定値である。加算された誤差（ノイズ）は v で表現しているが、これは平均値零で、分散 $V_I(k-1)$, $V_I(k)$, $V_T(k)$ 及び $V_U(k)$ に関してそれぞれ白色信号^{*1} プロセスから導入されるものと仮定している。これらの仮定は論理の展開の中で部分的に除去して行くことが出来るが、基本的な考え方は不変である。ここまでのところでは、測定誤差が正規分布をするという仮定を必要としていない。

さて、 $M^a(k)$ の測定値は、^{*2} (2-12) 式の表現を用いると

$$M(k) = I(k-1) - I(k) + T(k)$$

と書ける。別の表現をすれば

$$M(k) = M^a(k) + v_M(k) \quad (2-13)$$

ただし

$$v_M(k) = v_I(k-1) - v_I(k) + v_T(k) \quad (2-14)$$

$v_M(k)$ は平均値零で、分散

$$V_M(k) = V_I(k-1) + V_I(k) + V_T(k) \quad (2-14)$$

をもつが、これは在庫測定を通じて逐次的に相関している。しかしながら、あるひとつの物質収支期間の末期における在庫の量が当該期間における正味の物質移動量に比べて極く僅かなものであれば、あるいは在庫測定の誤差が相対的に小さければ、この逐次的相関は小さなものとなり無視する事も可能である。

さて、保障措置の観点から大切なのは $D^a(k)$ の量である。つまり、各タイム・インターバルの間に転用された実際の量である。しかしながら、 $U^a(k)$ に関してさらに何らかの別の知識が得られない限り、 $U^a(k)$ の累積量 $\sum U^a(k)$ が測られた時以外に $D^a(k)$ の値を $M(k)$ から推定することは、通常の方法では出来ない。

これを可能とする方法として考えられたのが「動的物質収支」であり、新しい変数を定義することである。それを $MB(k)$ で表わすと、

$$MB(k) = \begin{cases} M(k), & \sum U^a(k) \text{ が測られていない時} \\ M(k) - \sum U(k), & \sum U^a(k) \text{ が測られた時} \end{cases} \quad (2-10)$$

*1 白色信号プロセスは、異なった時間に採られたノイズ・サンプルが互いに相関しないようなノイズ発生プロセスをいう。白色信号から採られた逐次的サンプルは、逐次的に非相関であるという。

*2 実際には $M^a(k)$ を直接測ることはほとんどやれない事であり、大抵は間接に測ったものから計算するが、ここでは測定値として取り扱う。

となり、その分散は

$$V_{MB}(k) = \begin{cases} V_M(k), \sum U^a(k) \text{ が測られていない時} \\ V_M(k) + V_U(k), \sum U^a(k) \text{ が測られた時} \end{cases} \quad (2-17)$$

で表わされる。

もし転用を除く全ての核物質の移動が測定されているとしたならば、常に $MB(k)=M(k)$ でなければならない、零でない $MB(k)$ は測定誤差による不確かさと、もしあったとすればその転用との2つの原因に依るものしかないことになる。それは極めてまれな場合であって、実際には未測定物質移動が存在して、これが転用の存在を隠すことになる。そこで、動的物質収支 $MB(k)$ の中で $D^a(k)$ によって出て来た要素を推定する必要があるわけであるが、その為に3つの方法が考えられている。

第1は、この時点では $\sum U^a(k)$ から $D^a(k)$ を分離することをあきらめることである。そのかわりに決定分析のプロセスの中で適切な分離を行なう。このためには、正常な未測定核物質のサイド・ストリーム($U^a(k)$)によって作られる統計量の中に存在する傾向と、核物質の転用が原因で作られる統計量の中の傾向を区別するためにパターン・レコグニション技術を用いる必要がある。

第2の方法は、 $U^a(k)$ の統計量は定常的であると仮定して、その前の $\sum U(k)$ の測定を現在の $MB(k)$ に外挿する方法である。すなわち、各々の $MB(k)$ から $\frac{1}{m} \sum U(k)$ を引き、各 $MB(k)$ の分散には $\frac{1}{m} V_U(k)$ を加え、 $\sum U^a(k)$ の測られた最後の $MB(k)$ に $\sum U(k)$ を加えればよい。このようにすれば修正された $MB(k)$ は、 $D^a(k)$ の推定量となり、その分散も修正されたものとなる。

第3の方法は第2と似ているが、 $\sum U(k)$ の測定から行なう $MB(k)$ とその分散の修正が前の m 個の物質収支全部に対して適用されるという点で異なる。この場合、 $MB(k)$ を決定分析のプロセスに用いるには、その前に m 個のタイム・インターバルの遅れが必要となってくる。このため、タイムリネスと精度の両方を改良するためには第2の方法と第3の方法を併用する必要があるだろう。

さて、上記いずれの方法が採られようとも、測定の結果として得られるのは一連の動的物質収支のデータ、即ち、 $\{MB(k), k=1, 2, \dots\}$ である。又、各 $MB(k)$ の分散 $V_{MB}(k)$ は、既知の測定誤差から導かれている筈である。もし幾つかのタイム・インターバルの間で転用があったとすると、その期間の物質収支の値は正の値を持つ傾向があるだろう。即ち、物質収支が正の値をとる確率は転用の増加と共に増大して行くことになる。とはいえ、実際の転用は既述のサイド・ストリームで隠蔽される可能性がある。サイド・ストリームの量は累積され、かつ、測定頻度は少なく、これも転用と同じく物質収支の値を正にする方向のものである。従って、単純な $MB(k)$ の正の傾向だけつかんでも、それだけでは転用の検出には必ずしも連がらない。

保障措置のための計量管理データの解析は次の3つの機能をもっている。即ち、

- (1) $MB(k)$ の中で正の値の存在を検出し、
- (2) それらの値を推定し、かつ、それらに対する一群の統計量を推定し、

(3) それらの推定値がどれ程の有意性を持つかを決定する、
 ことである。しかもこれらの解析は、タイムリに実施し、かつ、逐次的決定を下して行く事が
 本質的に重要なことである。

これらの要請を満足するために開発されたのは、逐次決定理論、統計仮説検定、フィルタリ
 ングと推定法などのよく開発された理論や技術を、効果的に、かつ、システムティックに構築
 した一連の決定分析手法である。その一例を Fig. 2.3 に示す。説明は省略するが、このような
 分析手法は日本原子力研究所に於て既にコード・システムとして開発されており、

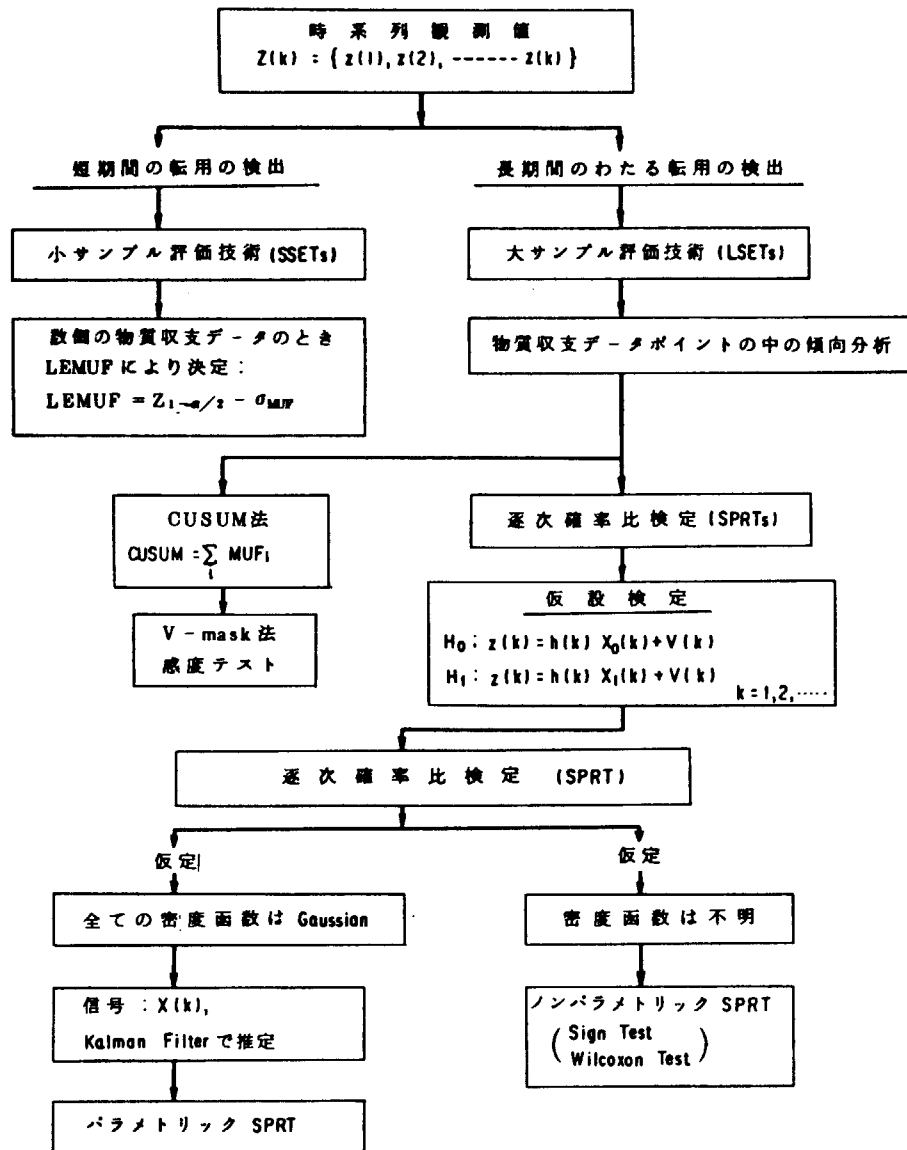


Fig. 2.3 決定的分析のブロック・ダイアグラム

TASTEXプロジェクトに於て、PNC再処理プラントに対する動的計量管理の適用性研究で
 フルに活用されている。

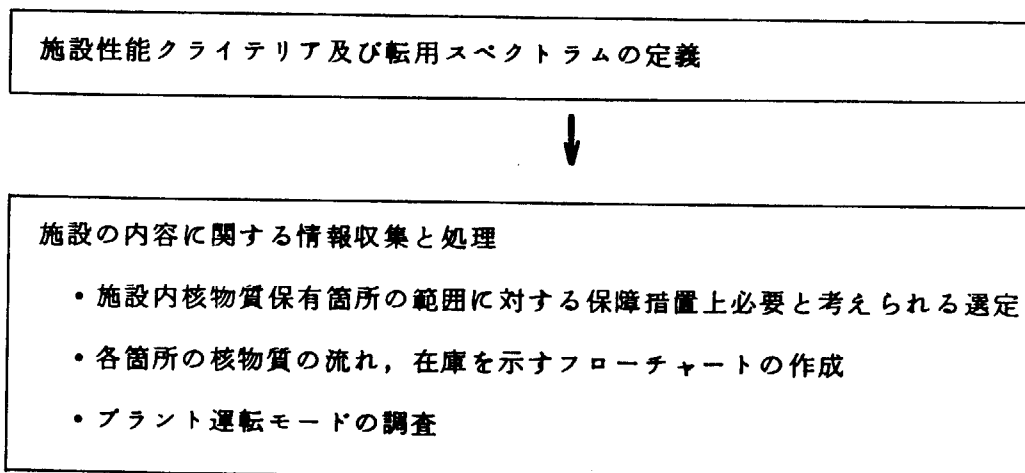
2.1.4 動的計量管理システムの設計法

Fig. 2.4 は動的計量管理システムの設計法を示したものである。既に述べたように、動的計量管理が目指すタイムリー検出と検出感度の向上の効果は、プラントの建設前にあらかじめ評価しておかなくてはならない。そのため、この設計法はその有効性の評価法と一体となっている。本図には、単に動的計量管理のみでなく、C/S について設計・評価法も組み込まれているが、これはあくまでも計量管理を補完する目的である。

この図で特に注意を喚起したいのは、評価のところで「正常運転状態」と「異常運転状態」の下で種々の評価解析を行なっている点である。転用や不法活動のシナリオを限定したとしても、実際のプラントにそれを適用する場合には対応する場合の数が多過ぎる。従って、プラントの保障措置能力を評価するためには、多数の事象を短時間に模擬出来るコンピューターによるダイナミック・シミュレーションの技術を用いるのが得策である。この技術は、当初、計量会計管理に関しては米国ロスアラモス研究所で、physical protection に関しては米国サンディア研究所で開発されたが、日本では原子力研究所で開発しており、成果の一部は日本原子力学会（昭和55年春の年会）や、米国原子力学会（1979年11月 Kiawa Island）に於て発表している。この方法は、原研では今の所再処理施設、プルトニウム転換施設及びMOX 燃料加工施設に対して適用され、コード・システムも開発されている。これまで濃縮プラントに対しては適用研究が開始され、第一段の準備が終ったところである。

一般的なこの方法のアウトラインをブロック・ダイアグラムで表記すると以下のようなになる。

(1) 施設の特性化





転用シナリオの選定

- 転用対象核物質と転用発生箇所の特定化
- 転用モードの設定
 - { Abrupt Diversion (Single 及び Random)
 - { Protracted Diversion (Uniform, Variational)
 - { 施設の悪用
 - { 直接転用／偽造転用

(2) 動的計量システムの測定・分析系の構成

- 計量管理モデルの選定 (リアル・タイム, ニア・リアルタイム, セミ・ダイナミック, ……)
- 各測定点での測定法, 分析法, 測定器械, 測定精度の特定化
- 物質収支区域, 動的物質収支区域の設定

(3) 評価解析

※



ダイナミック・シミュレーションによる施設の正常運転時及び異常運転時の核物質の流れ, 在庫の真値を解析する。



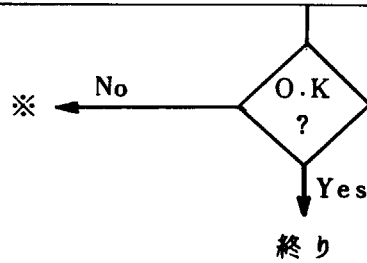
各測定点における測定を, 計量管理モデルに従ってシミュレートして模擬測定値の集合を作る。



- シミュレートした測定値の集合に対して、転用の有無を判定する統計的決定分析（CUSUM法，V-mask法，Kalman Filter法，Wilcoxonテスト法など）によって、真値に潜入させた転用を検出出来る確率を求める。
- 仮定した全ての転用モードについてシミュレーション分析を行なう。



- 確率を性能クライテリアと比較して、クライテリアに合う計量管理モデル及び測定法を特定する。
- 経済的及び運転上の評価をする。



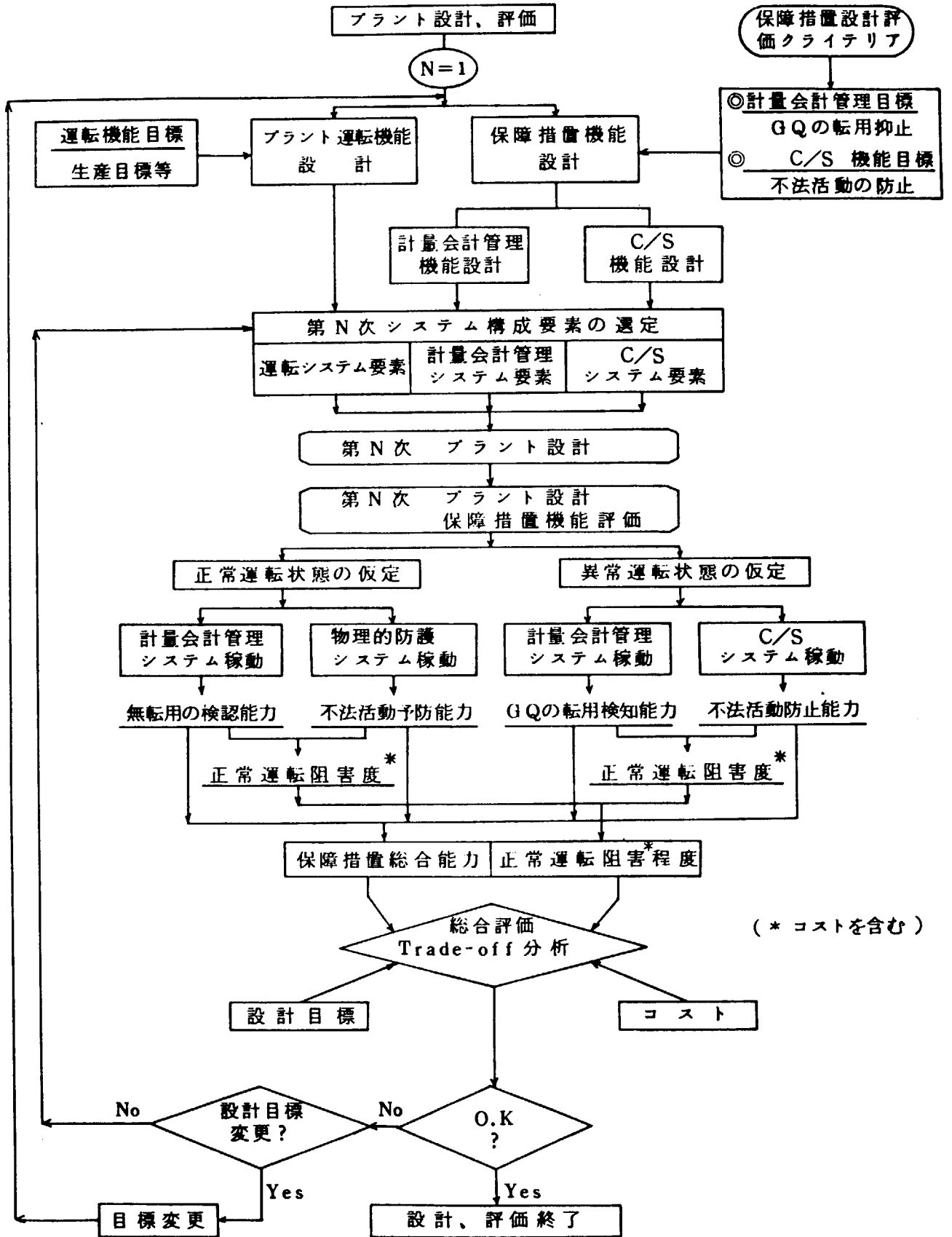


Fig. 2.4 動的計量管理システムの設計と評価

2.2 仮想濃縮プラントに於ける静的計量管理

本研究で対象とした遠心分離濃縮工場のモデルとして以下を仮定する。

(1) シリンダー・サイズ

プロダクト 2 ton UF₆ (60 Kg²³⁵UF₆)

フィード 12 ton UF₆ (84 Kg²³⁵UF₆)

(2) 計測器

重量計 精度 ±0.02%

流量計* 精度 ±1%

質量分析計 精度 ±0.16%

(*校正頻度: 2日~1週間に1回)

(3) サンプリング

ポンペ毎の濃縮度を測定するが、連続分析は行わない。

(4) 査察官のアクセス

カスケード室はブラック・ボックス

カスケード室外周はアクセス可能

(5) インベントリ

全プロセス・インベントリ: 約 130 ton UF₆ 以下

UF₆ 供給回収棟: 約 70 ton UF₆ 以下

UF₆ 処理室: 約 60 ton UF₆ 以下

カスケード室: 全プロセス・インベントリーの約 1/100 以下

上記のシリンダー・サイズに関する値から、バッチ・データを作成し、それを用いて σ_{MUF} の粗い推定を行なってみる。Table 2.4 及び 2.5 はそのための基礎データである。 σ_{MUF} の計算にあたって、簡単のために施設者のサンプル分析はバッチ当り 1 回、又、ランダム誤差と系統誤差の大きさは同じであると仮定する。

A) 通常のカスケードから物質の転用を考える時

極めて雑把な計算を行なった場合、 σ_{MUF} の値は次のようになる。

施設を 1 MBA とし、PIT 頻度を 1 回/年としたとき

$$\begin{cases} \sigma_{MUF}^2 = 5902 \text{ Kg}^2 \text{ }^{235}\text{U} \\ \sigma_{MUF} = 77 \text{ Kg } ^{235}\text{U} \end{cases}$$

であり、PIT 頻度を 3 回/年とすると

$$\begin{cases} \sigma_{MUF}^2 = 659 \text{ Kg}^2 \text{ }^{235}\text{U} \\ \sigma_{MUF} = 26 \text{ Kg } ^{235}\text{U} \end{cases}$$

Table 2.4 モデル・プラントのスループット及びバッチ数

プラント全体に対する諸量		フィード	プロダクト	テイル
核物質	ton U/a	3,694	664	3,030
	kg ²³⁵ U/a	2,663.4	2,065.0	5,969
	kg ²³⁵ U/month	2,219	1,721	497
バッチ	kg ²³⁵ U/batch, \bar{X}_i	56.8	40.6	16.2
	batches/a	469	509	368
	batches/month	39	42	31
1運転単位あたりの諸量		フィード	プロダクト	テイル
核物質	ton U/a	123.1	22.1	10.1
	kg ²³⁵ U/a	887.8	687.3	199.0
	kg ²³⁵ U/month	74.0	57.3	16.6
バッチ	batches/a	15.6	16.9	12.3
	batches/month	1.3	1.4	1.0

Table 2.5 異なるPIT頻度における物質収支の目安◎

物質収支回数 (回/年)	ストラーク _i	フ			イ						7カスケ- 17ド室+
		ロ			ン						
		8	9	10	UF ₆ 供給回収棟*			UF ₆ 処理室*			
		フィード	プロダクト	テイル	1 11	2 12	3 13	4 14	5 15	6 16	
1	Ti : 核物質質量 kg 235 U	26634	20650	5969	170	132	39	146	114	33	64
	Pi : バッチ数	469	509	368	30	33	24	26	28	20	1
2	Ti : 核物質質量 kg 235 U	13317	10325	2985	170	132	39	146	114	33	64
	Pi : バッチ数	234	255	184	30	33	24	26	28	20	1
4	Ti : 核物質質量 kg 235 U	6659	5163	1492	170	132	39	146	114	33	64
	Pi : バッチ数	117	127	92	30	33	24	26	28	20	1
1	Ti : 核物質質量 kg 235 U	8878	6873	1990	170	132	39 [※]	49	38	1.1	0.2
	Pi : バッチ数	156	169	123	30	33	24	1	1	1	1
2	Ti : 核物質質量 kg 235 U	4439	3437	995	170	132	39	49	38	1.1	0.2
	Pi : バッチ数	7.8	8.5	6.2	30	33	24	1	1	1	1
4	Ti : 核物質質量 kg 235 U	2220	1718	498	170	132	39	49	38	1.1	0.2
	Pi : バッチ数	3.9	4.2	3.1	30	33	24	1	1	1	1

*フローの比率で存在するものと仮定
+全プロセス・イベントリイの1/100
※このワク内の数字は運転単位に対応させていない。
◎廃棄物については除外している。

となる。これらからMUFの誤差限界LEMUFを求めること、

$$1 \text{ PIT/年のとき} \quad \text{LEMUF} = 154 \text{ kg } ^{235}\text{U}$$

$$3 \text{ PIT/年のとき} \quad \text{LEMUF} = 52 \text{ kg } ^{235}\text{U}$$

となる。これより、年3回のPITを行えばIAEAのクライテリアである75 kg²³⁵Uの範囲内にコントロール・チャートを持って来ることが出来るが、しかし、ぎりぎりか、あるいは未だ大き過ぎるかも知れない。というのは、 σ_{MUF} の計算でインベントリの項及び廃棄物の項を落としているからである。恐らくは年4回のPITを仮定して、始めて75 kg²³⁵Uのクライテリアを満足することが出来るのではなからうか。もうひとつのクライテリアであるタイムリネスは、その場合3ヶ月の検出時間が対応することになる。IAEAのいう1~3週間はとても無理である。

さて、仮に物質収支区域が運転単位毎になったと仮定してみると、その場合、

$$12 \text{ PIT/年のとき} \quad \sigma_{\text{MUF}} = 0.332 \text{ kg } ^{235}\text{U}$$

$$1 \text{ PIT/年のとき} \quad \sigma_{\text{MUF}} = 2.6 \text{ kg } ^{235}\text{U}$$

という数字が得られる。この数値は、後に述べる動的物質収支を運転単位毎に適用する場合に役に立つものである。

B) 秘密カスケードが運転されているとした場合

$$\begin{aligned} \text{フィード} &= 5149 \text{ kg U/a} \\ &= 37.13 \text{ kg } ^{235}\text{U/a} \\ &= 3.09 \text{ kg } ^{235}\text{U/month} \\ &= 714 \text{ g } ^{235}\text{U/week} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{プロダクト} &= 28.8 \text{ kg U/a} \\ &= 26.8 \text{ kg } ^{235}\text{U/a} \\ &= 2.23 \text{ kg } ^{235}\text{U/month} \\ &= 515 \text{ g } ^{235}\text{U/week} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{テイル} &= 5121 \text{ kg U/a} \\ &= 10.2 \text{ kg } ^{235}\text{U/a} \\ &= 853 \text{ g } ^{235}\text{U/month} \\ &= 196 \text{ g } ^{235}\text{U/week} \end{aligned}$$

の量が秘密カスケードに流されるものと仮定する。その場合転用者はこれらの量を測定誤差あるいはデータ偽造の中にごまかさなくては転用を果せない。静的計量管理でプラント全体を1 MBAとした場合にはこれらを検出することは不可能である。

しかし、運転単位毎のMBAを採ったとするとこの秘密カスケードが30の運転単位のどれか一つに全体として存在すると仮定するならば、これらはいずれも検出可能である。したがって、静的計量管理を行なう場合には運転単位毎に30ケのカスケードMBAを含むMBAの構成を作らなくてはなるまい。しかし、それでも尚、IAEAの1~3週間の検出時間というタイムリネスの要求に応えることは出来ない。これに応えるためには次節で述べる動的計量管理の導入という考え方を採らざるを得ない。

もうひとつの解決方法として、IAEAのクライテリアそのものを変更する、という方法があ

る。これを行なうには保障措置、特に国際保障措置と核不拡散のメカニズムのあり方から考え直す必要があるだろう。これについては、既に INFCE に関連してその他のところで論じられている。しかし本節のこれからの部分では、一応 IAEA のクライテリアを肯定しておき、動的計量管理がそれに対してどのような満足度を与えうるかを検討してみることにする。

2.3 動的計量管理の適用の可能性と問題点

2.3.1 可能性の予測

東海再処理プラントに対する動的計量管理の適用性の研究は、その将来性と可能性を示した。特にシミュレーション技術による転用感度解析の方法が、計量管理システムの有効性を評価するのに非常にパワフルなものであることを知り得た。動的計量管理システムに限らず、計量管理システムが転用の抑止に如何なる力を発揮するかを知るには、今のところこれ以外の方法はあるまいという事も判った。この観点から、遠心濃縮プラントに対する動的計量管理の適用可能性についても、シミュレーションに依る評価解析を行わずして一般的には、結論を出すことは出来ない。

一方、再処理工場において1週間毎のダイナミック PIT をベースにした 10-day-detection-time-model によれば、動的物質収支期間（7日）毎の転用の割合が、その期間の測定の不確かさ、 σ_{MUFd} 程度のものであれば可成り容易に検出する事が可能であり、このことは必ずしも再処理工場のみ特定の事ではなく、或る程度一般的に云えることもわかった。

定量的に正しい結論を得るには、前記の如くシミュレーションによる設計、評価解析を行わなければならないとしても、濃縮プラントにおいて σ_{MUFd} をある程度 (Protracted Diversion のクライテリアを満足する程に) 小さくする仕掛けさえ作っておけば、10-day-detection-time-model に類似の動的計量管理システムを作り上げる事は可能であろうという見通しは立つ。東海再処理工場の場合、運転モードにより異なるが、 σ_{MUFd} の値は 200 ~ 500 g Pu 程度である。これは週間の Throughput 16 kg Pu ~ 34 kg Pu の 1.3% ~ 1.5% である。IAEA のクライテリアからすれば、低濃縮ウランの場合、有意量は 75 kg ^{235}U である。これを年間で秘かに転用するとすれば、1週間あたり 1.44 kg ^{235}U の転用率に相当する。したがってこの場合、weekly-dynamic PIT をベースにすれば、週間の σ_{MUFd} は高々 1.5 kg ^{235}U 程度でよいことになる。モデル濃縮プラントの週間フィード量は約 520 kg ^{235}U であるから、これは 0.3% 程度に相当する。この程度の値は、現在の IAEA の期待精度 σ_{MUF}^E が 0.2% であることからしても当然達成可能の範囲にあると考えられてよからう。

しかし、動的計量管理を採用するとすれば、上に述べたところで仮定しているように、1施設 = 1MBA という考え方は採らない方が得策である。むしろ、1運転単位を1動的物質収支区域とするような計量管理法にする方が容易でもあり、遥かに効果的である。このようにした場合、前記の検討内容は相当変わってくる。即ち、1運転単位における週間フィード量は Table 2.4 より 887.8 kg / 52週 = 17.0 / kg ^{235}U であるから、その中で 1.44 kg ^{235}U の転用をしようとするれば、それは 8.5% に相当する転用となり、極めて容易に検出可能であろうと思われる。また秘密カスケードの場合もこれが全運転単位に均等に分散されているので無い限り

0.5 kg ^{235}U /wk の転用が対象となり、これはフィード側 17.0 kg の 2.9%、プロダクト側 687.3 kg/52 週 = 13.2 kg の 3.8% に相当する。

この検出能力を実現させるためには、動的物質収支を 1 運転単位毎、あるいは数個のまとまった運転単位毎に導出出来るような計測システムを設ける必要がある。動的物質収支の場合、必ずしもバッチ毎の計量でなくても流量と濃縮度及び元素係数が計られればよいと考えられる。現モデルプラントには運転単位毎に流量計が設けられているので、後はアイソトープ・ファクターとエレメント・ファクターを測る測定器を設置すればよい。勿論、運転単位ないしは数個の運転単位毎の動的物質収支が確定出来るように配管系等の配列を再検討する必要がある。

また、1 運転単位に含まれるインベントリは極少であり、これは恐らく動的物質収支に殆んど影響を及ぼさないであろう。これを省略することが可能となれば、動的 PIT というのは、単に動的物質収支を計算する Time point の意味になってしまう。この検討は、しかしながら転用シナリオとの関連で定量的に行なってみる必要がある。

このような検討は、フローシミュレーションに基づく転用検知力の解析評価によるのが最も簡単で、かつ、信頼出来る結果が得られる事であろう。

2.3.2 問題点

動的計量管理を遠心濃縮プラントに適用されればその有効性は非常に高いものになるであろうと述べたが、しかし、問題が無いわけではない。それは動的計量管理を成立させるためには施設設計の改訂を必要とすること、ならびに、実行段階に到って施設者の仕事が増大する可能性があることである。いずれもコストの上昇に連がる。

もうひとつの問題点は、リアル・タイムな用途に役立つ測定装置の開発の問題である。動的物質収支区域の出入口が正真正明のガスフローであるから、流量の外に、アイソトープ・ファクター及びガス密度を常に測定していなくてはならない。ロスアラモス科学研究所では in-line 用の Gas phase enrichment meter の開発が進められているが、このような装置の開発の成否が遠心プラントへの動的計量管理の適用の成否にも連がるであろう。

施設者が動的計量管理を実施し、IAEA はその信頼性を検証活動によって確認するというのが現在の一般的認識であるが、どのような検証活動が必要であるかについては施設毎にそこで適用される動的計量管理方式に適した形をみつけ出して行かなくてはならないだろう。

2.3.3 可能性の定量的検討法の開始

2.1.4 で述べたように動的計量管理の保障措置上の有効性を評価する方法として、シミュレーション技術を用いる方法が開発されて来ている。この技術を濃縮プラントに対しても適用すべく、本研究に於てその準備を行なった。

昭和54年度に実施した作業はプログラムの設計と一部のコード化である。目標としているコード・システムは、所要の分離作業量能力をもつカスケードを設計し、かつ、その定常特性と非定常特性の解析、ならびにカスケードの一部の段の挿入、排除がプラント全体の動特性に与える影響を解析する機能をもつプログラムである。

このプログラムの構成は Fig. 2.5 に示すようなものであって、解析結果をグラフィックに表

示して解析者の理解を容易ならしめる工夫をすることを考えている。このコード・システムを用いることにより、正常時のカスケードの運転と秘密カスケードが運転されている異常時の運転状態下におけるプラント動特性に関する知識を蓄積することが可能となる。この知識の蓄積を基に、正常運転から異常運転に移行したときに発生する Anomaly Signal を見つけ出すことが可能となるであろう。

定常状態に於けるカスケード特性の解析に用いられる定式化は、既に十分開発済みのところであり、本研究にとっては、これを引用することで十分目的を達する。そこで参考文献(8)、(9)及び(10)を活用し、これを基に次のステップの利用の便を考えて、あらたにコードを作成した。

又、非定常特性の解析のための定式化は、方形カスケードについては成瀬他の研究(11)があり、そこで開発された解析コードシステムを一部改良して、使い易いものとした。理想カスケードの非定常特性の解析法は、方形カスケードの場合を参考にして、本研究に於て定式化を計った。コード化は今後の作業である。

これらの一連のコードは、Fig. 2.5 の中で左側の流れに用いられるものであって、Clandestine Cascade の共存している場合には、そのまゝでは用いられない。これを可能とする作業が本研究の次のステップである。

本コードシステムは、GASPIV (シミュレーション・ランゲージ) を用いた本格的 Flow Simulation コードを開発する際の、カスケード部分を Simulate するための一要素を構成することになる。

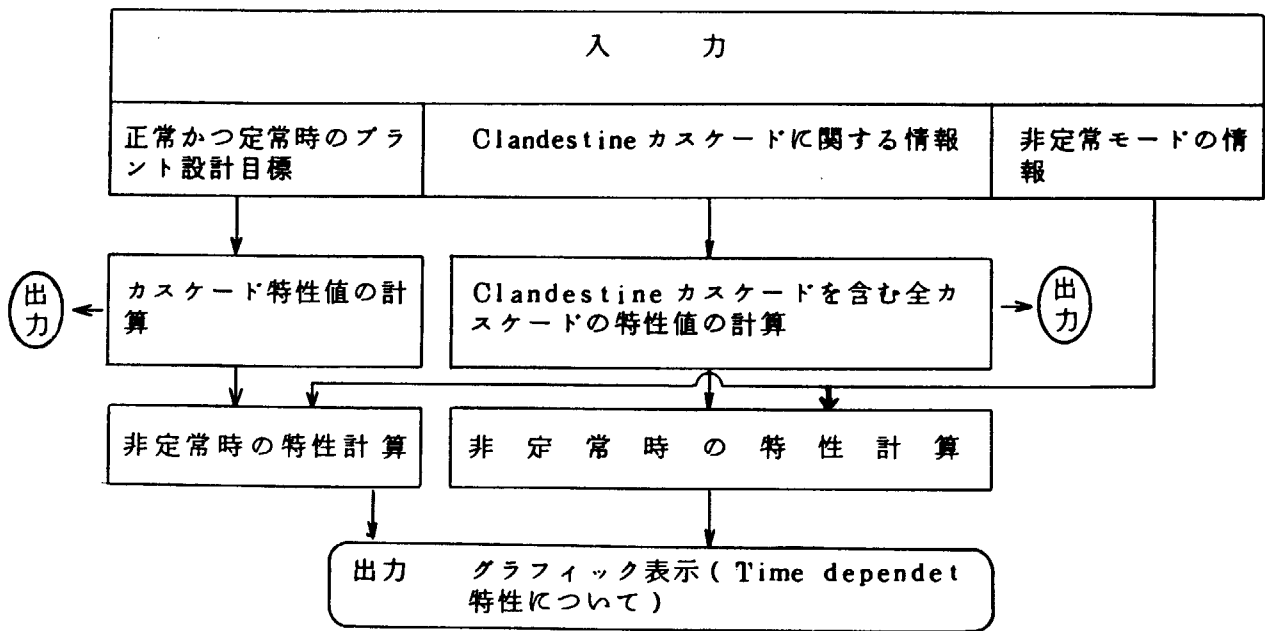


Fig. 2.5 カスケード特性解析プログラムの概要

3. 結 言

濃縮プラントの保障措置はいかにあるべきかという研究は、国際的にも今その緒についたばかりである。本研究は、それらの文献を調査し、問題点を把握し、TASTEX プロジェクトの遂行で得られて来た動的計量管理法に関する知見を総括して現状を把握し、今後の研究の方針を検討したものである。これまでの研究から、動的計量管理の採用により、ある程度の改良（有効な保障措置の観点から）が可能であろうとの見通しを得た。今後は、その定量的検討による確認と、さらにその過程で出て来るであろう新たな問題の解決に向かって行こうと考え、準備を進めているところである。

尚、本研究では、封じ込め／監視の強化に関する検討を極く簡単に行ったが、これについては別の機会に検討を進めるべく、考察を進めているところである。

謝 辞

本報告書は、昭和53年度原子力平和利用研究の一環として政策科学研究所において実施した研究の成果(12)と、動力炉・核燃料開発事業からの昭和54年度の委託研究として核物質管理センターで実施した研究の成果(13)をまとめたものである。それぞれの研究を通じて、有益なコメントを頂いた参加者の方々に深く感謝致します。特に、両研究を進めた委員会の委員長をされた今井隆吉氏（現クエート大使）、本研究の進行にあたって適切なる助言を常に頂いた平田実穂氏（企画室次長）、濃縮プラントに関する貴重な知識を与えて頂いた成瀬雄二氏（トリチウム技術研究室長）に心からの謝意を表したいと思います。又、外部機関を場として行なわれて来た本研究委員会への参加に関し、温かい配慮を頂き、かつ、適切なる助言を頂いた当研究室長吉田弘幸氏に心から感謝致します。コード開発にあたっては、当研究室の井原均研究員の助力ならびにセンチュリー・リサーチ・センタ(株)の久松義徳の多大の努力があったことをここに記し、感謝の意を表したいと思います。

参 考 文 献

- (1) UN Document A/6858, October 1968
- (2) M. Wilrich and T. Tayler, "Nuclear Theft: Risk and Safeguards", Ballinger Publishing Company, Cambridge 1974
- (3) IAEA, Safeguarding Uranium Enrichment Facilities, Review and Analysis of the Status of Safeguards Technology for Uranium Enrichment Facilities, AG-110 April 1977
- (4) N. S. Babev, A. A. Sazykin, O. A. Miller, Yu. V. Verbin, E. I. Abba kumov, "Some Technical Aspects of the Application of I. A. E. A. Safeguards to Uranium-Enrichment Facilities." LA-TR-77-57, IAEA-SM-201/110, October, 1975
- (5) T. Minato, "Safeguarding a Gas Centrifuge Pilot Plant in Japan", IAEA-SM-231/31, October 1978
- (6) W. Bahm, D. Gupta, H. J. Didier, J. Weppner; "Nuclear Materials Management in a Uranium Enrichment Facility based on the Separation Nozzle Process", p. 337-p. 347, 1978 INMM Proceedings
- (7) J. W. Tape, M. P. Baker, R. Strittmatter, M. Jain, and M. L. Evans; "Selected Non-Destructive Assay Instrumentation for an International Safeguards System at Uranium Enrichment Plants", LA-UR-79-1843, July 1979
- (8) 成瀬雄次, 吉田浩, 藤根幸雄, 青地哲雄, 東邦夫, 藤野清彦, 塩沢茂雄; "ガス拡散法によるウラン濃縮の経済評価", JAERI-M 7344, 1977年11月
- (9) 成瀬雄次, 吉田浩; "多孔質隔膜法による気体の分離", JAERI-M 7858, 1978年9月
- (10) 山本寛他, 原子力化学工学, 日刊工業新聞社, 1976年
- (11) 成瀬雄二, 丸山庸一郎, 青地哲雄, 東邦夫, 山崎博, 大藤芳久, "ガス拡散プラントの非定常特性の解析"(1)方形カスケード, JAERI-M 6272, 1975年10月
- (12) (財)政策科学研究所, 「核不拡散の観点からのウラン濃縮技術の調査研究」, CR-78-5, 1978年12月
- (13) (財)核物質管理センター, 「遠心法濃縮施設の保障措置システムに関する研究」, EZJ 699-79-302, 1980年5月